

# Klimatologie von Gewittern im Gebiet der COPS Messkampagne

Leslie Grebe



14. Oktober 2009

Klimatologie von Gewittern im Gebiet der COPSPrecipitation Study Messkampagne

Leslie Grebe

Diplomarbeit

Erstgutachter  
Dr. M. Hagen

Zweitgutachter  
Prof. Dr. G. Craig

Meteorologisches Institut München  
Fakultät für Physik  
Ludwig Maximilians Universität München

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>2</b>
1.1	Motivation . . . . .	2
1.2	COPS Messkampagne 2007 . . . . .	2
1.3	Klimatologie von Gewittern im COPS Gebiet . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Theoretische Grundlagen</b>	<b>6</b>
2.1	Definition von Gewittern . . . . .	6
2.2	Entstehung von Gewitter . . . . .	6
2.2.1	Hebung . . . . .	6
2.2.2	Labilität . . . . .	7
2.2.3	Feuchte . . . . .	12
2.2.4	Orographischer Effekt . . . . .	13
2.3	Arten von Gewittern . . . . .	13
2.3.1	Luftmassengewitter . . . . .	14
2.3.2	Frontengewitter . . . . .	16
2.3.3	Mesoskalige Konvektive Systeme . . . . .	16
<b>3</b>	<b>Datengrundlage und Darstellung</b>	<b>20</b>
3.1	Datenmaterialien . . . . .	20
3.1.1	Untersuchungsgebiet . . . . .	20
3.1.2	Blitznetz . . . . .	21
3.1.3	RADAR DWD Komposit . . . . .	23
3.1.4	Bodenwetterkarten . . . . .	25
3.1.5	Radiosondenaufstiege . . . . .	26
<b>4</b>	<b>Analyse und Auswertung</b>	<b>28</b>
4.1	Häufigkeitsverteilung der Gewittertage . . . . .	28
4.2	Gewittersysteme . . . . .	32
4.3	Luftmassengewitter . . . . .	33
4.3.1	Windrichtung . . . . .	34
4.3.2	Zugrichtung . . . . .	36
4.3.3	Vergleich verschiedener Gewitterparameter . . . . .	38
4.3.4	Entstehungsorte . . . . .	42
4.3.5	Entstehungszeit . . . . .	52
4.3.6	Orografische Aufteilung . . . . .	55
4.4	Frontensysteme . . . . .	60
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>68</b>

# Zusammenfassung

In dieser Arbeit werden klimatische Statistiken über die Eigenschaften von Gewittern in der Mittelgebirgsregion in Südwestdeutschland und Ostfrankreich erstellt. Das Hauptinteresse liegt dabei weniger bei den Eigenschaften von Frontengewitter, sondern vielmehr bei den Eigenschaften von Luftmassengewittern. Neben statistischen Angaben über Häufigkeitsverteilungen und Zugrichtungen von Gewittern gilt ein besonderes Interesse den Entstehungsorten von Luftmassengewitter in Abhängigkeit ihrer Windrichtung. Die Ergebnisse stimmen relativ gut mit den Beobachtungen von [Hagen, M., et al., 2009] überein, die während der COPS Messkampagne erfolgten. Neben den Entstehungsorten von Gewittern werden auch die Entstehungszeiten in Abhängigkeit von bestimmten Regionen untersucht. Dabei scheinen Gebirgsregionen im Hinblick auf frühere Gewitterentwicklungszeiten eine ausgeprägte Rolle zu spielen. Des Weiteren werden verschiedene Gewitterparameter miteinander verglichen, unter anderem CAPE-Werte von zwei Stationen in dem Untersuchungsgebiet, die allerdings relativ schlecht repräsentative Werte darstellen.



# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Gewitter und Unwetter vom konvektiven Typ können den Menschen und sein Umfeld stark beeinflussen, vor allem die Begleiterscheinungen und Nachwirkungen dieser Ereignisse. Die starken Niederschläge führen häufig zu lokalen Überschwemmungen. In nicht ebenen Gebieten kommt auch noch die Gefahr von Erdrutschen und Muren hinzu. Hagel, der nur bei Gewittern auftritt, bedroht Ernten und Sachgegenstände. Blitze können Ausfälle diverser menschlicher Einrichtungen (Stromversorgung oder Funknetze) verursachen und Brände auslösen. Für die Luftfahrt stellen Gewitter ebenso eine Gefahr dar. Hier ist mit schlechter Sicht und Turbulenzen durch vertikale Winde (bei einer Gewitterwolke) zu rechnen.

Es ist also von Interesse, das meteorologische Ereignis Gewitter möglichst genau vorherzusagen, damit Warnungen herausgegeben werden können.

## 1.2 COPS Messkampagne 2007

Im Sommer 2007 vom 1. Juni 2007 bis 31. August 2007 fand eine Messkampagne 'COPS' (*Convective and Orographically -induced Precipitation Study*) zur Niederschlagsforschung statt. Das ausgewählte Gebiet der Messkampagne befindet sich in Ostfrankreich und Südwestdeutschland, umfasst die Vogesen, den Rheingraben, den Schwarzwald und die Schwäbische Alb (siehe Abbildung 1). Das Gebiet mit den Mittelgebirgen und dem Rheingraben stellt ein komplexes Terrain dar, die für atmosphärische Wissenschaftler von großem Interesse ist. Zum einen können starke Niederschläge, wie sie zum Beispiel bei Gewittern entstehen, über orographischen Regionen zu flutartigen Überschwemmungen führen. Zum anderen sind die konvektiven Prozesse über orographischem Gelände noch relativ unerforscht und somit weder genau verstanden noch liefern die Wettervorhersagemodelle die passenden Ergebnisse nach [Wulfmeyer, V., et al., 2008].

Das Ziel dieser Messkampagne ist die Verbesserung von Wetter- und Klimamodellen. Bislang ging die Forschung davon aus, dass Landschaften wie das Rheintal die Luft wie in einem großen Kanal durchströmen lassen. Entsprechend vereinfacht stellen die Computermodelle zur Wettervorhersage die Luftströmung auch dar. Wie sich herausstellt, unterliegen diese Modelle einer zu starken Vereinfachung [Wulfmeyer, V., et al., 2008]. Dies führt zu fehlerhaften Wetterprognosen sowohl in der räumlichen Verteilung als auch für die zeitliche Entwicklung von Niederschlägen und Gewittern [Majewski und Ritter, 2006]. Von zentralem Interesse sind daher nicht Niederschläge, die durch Fronten entstehen, sondern vielmehr jene, die durch Hebung von Luftmassen in komplexem Gelände lokal gebildet werden. Dabei handelt es sich meist um Starkniederschläge und Gewitter, die sich relativ schnell entwickeln.

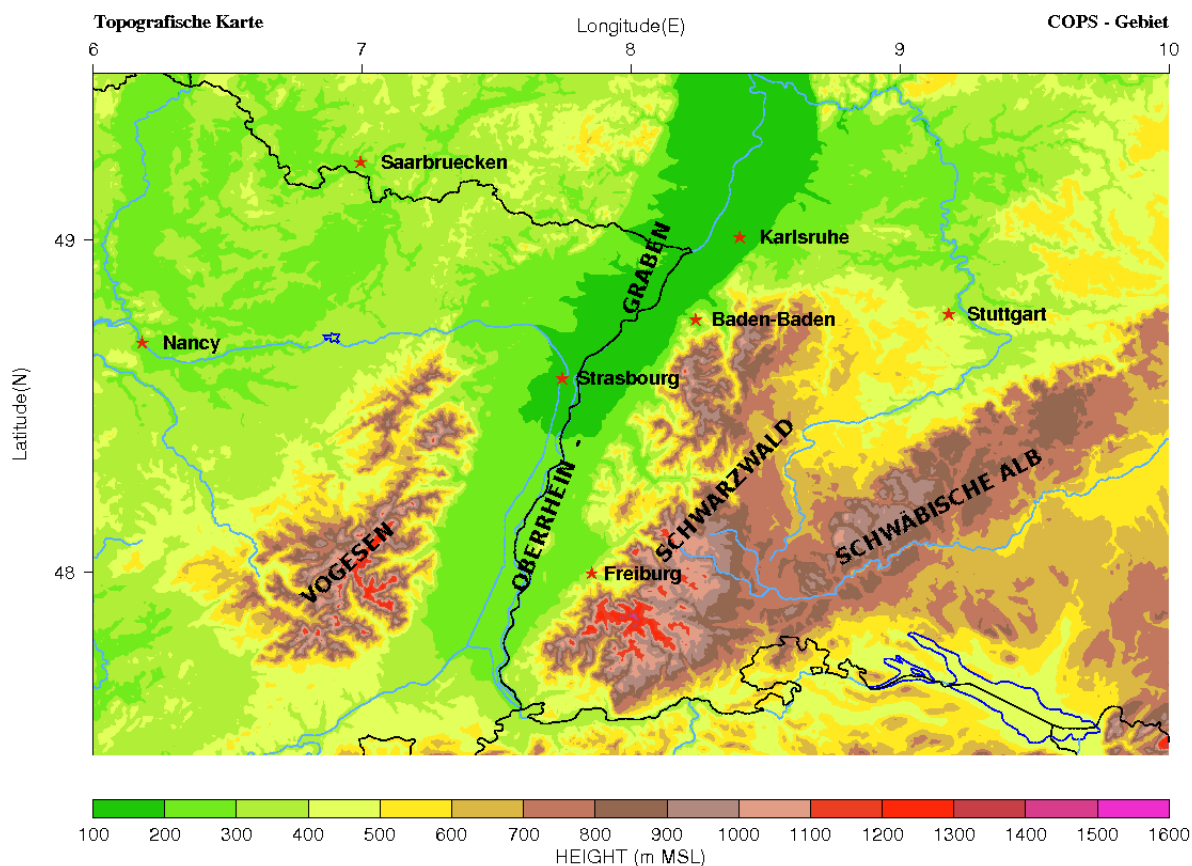


Abbildung 1: Das COPS Gebiet als topographische Karte. Die unterschiedlichen Farben entsprechen Linien unterschiedlicher Höhe. Blaue Linien kennzeichnen Flüsse die schwarzen Linien kennzeichnen die Ländergrenzen.

In dem Beobachtungszeitraum von 3 Monaten (1. Juni bis 31. August 2007) wurden Niederschlagsprozesse genauestens analysiert, um die quantitativen Niederschlagsvorhersagen qualitativ zu verbessern. Eine Vielzahl von Messinstrumenten stand dabei zur Verfügung. Das gesamte COPS Gebiet wurde mit einem Messnetz von über 100 Wetterstationen überzogen. Es handelt sich dabei um In-situ und Fernerkundungsmessungen, die mit Radar, Lidar, Sonar, Satelliten, Flugzeugen und zahlreiche Radiosondenaufstiegen in unterschiedlichen Gebieten durchgeführt wurden.

### 1.3 Klimatologie von Gewittern im COPS Gebiet

Die Messkampagne COPS beschränkt sich auf einen Beobachtungszeitraum von 3 Monaten (ein Sommer). Die Aufgabe dieser Arbeit war es, herauszufinden, wie die klimatologischen Beobachtungen von Gewittern in diesem Gebiet dazu aussehen. Es sollen Statistiken über die Eigenschaften von Gewittern erstellt werden, wie zum Beispiel Zugrichtungen, Zelltyp und Entstehungszeiten von Luftmassengewittern. Insbesondere für Luftmassengewitter besteht das Interesse, ob es bei gewissen Wetterlagen (abhängig vom Windprofil) Gebiete gibt, an denen bevorzugt Gewitter entstehen. Während der COPS Messkampagne gab es Vermutungen, dass sich Konvektionen in Abhängigkeit der Windrichtung an bestimmten Gebieten bevorzugt bilden, [Hagen, M., et al., 2009]. Durch Betrachtung eines längeren Zeitraums kann diese Vermutung unter Umständen verdeutlicht werden.

Ebenfalls klärt sich dadurch auch die Frage, inwieweit das Jahr der Messkampagne 2007 charakteristisch für die Region war.

Der gewählte Beobachtungszeitraum für diese Arbeit umfasst 11 Jahre von 1998 bis 2008. Eine längere Periode zu betrachten, war aufgrund der Verfügbarkeit der Daten nicht möglich.

Im folgenden werden nun zunächst einige theoretische Grundlagen erörtert, die für das Thema und die Auswertung von Interesse sind.



## 2 Theoretische Grundlagen

### 2.1 Definition von Gewittern

Ein Gewitter ist eine meteorologische Erscheinung, die mit luftelektrischer Entladung (Blitz) verbunden ist.

Nach der allgemeinen, meteorologischen Beobachtungsanleitung handelt es sich dann um ein Gewitter, wenn es wenigstens einen hörbaren Donner an der Beobachtungsstation gegeben hat. Der Donner entsteht durch die plötzlich starke Erwärmung des Blitzkanals auf bis zu  $30.000^{\circ}\text{C}^1$ , sodass die Luft sich schlagartig durch die Vergrößerung der Dichte mit Überschallgeschwindigkeit ausdehnt.

In der Regel treten bei Gewittern böige Winde auf, kräftige Niederschläge in Form von Regen oder auch Hagel. In seltenen Fällen kann es auch zur Ausbildung von Tornados kommen. In Deutschland sind die Bildungen von Tornados, die bei der Entstehung einer Superzelle auftreten können, aufgrund der fehlenden vertikalen Vorticity aber eher selten.

Häufig anzutreffen sind Gewitter vor allem in den Tropen, wo feuchte warme Luft zu großer Labilisierung führt.

### 2.2 Entstehung von Gewitter

Damit Gewitter entstehen können, müssen sich konvektive Wolken bilden, die über mehrere Wolken Stockwerke hinaus reichen, sogenannte Cumulonimbus Wolken.

Eine Wolke wird erst bei einer genügend dichten Ansammlung von Wassertröpfchen oder Eiskristallen sichtbar. Die Bildung der Tröpfchen und der Eiskristalle setzt allerdings die Anwesenheit von Kondensationskernen und Eiskeimen in der Atmosphäre voraus, an denen sich die Wassermoleküle anlagern können.

Gewöhnlich bilden sich Wolken bei Abkühlung der Luft bis zur Sättigungstemperatur, sodass entweder Kondensation zu Wassertröpfchen oder eine Sublimation zu Eiskristallen einsetzen kann. Da im Normalfall die Lufttemperatur mit der Höhe abnimmt, bestehen die Wolken in der höheren Troposphäre aus Eiskristallen, während sie in den tieferen Schichten überwiegend Wassertröpfchen enthalten.

Damit sich konvektive Wolken bilden, sind Feuchte, Hebung und Labilität nötig.

#### 2.2.1 Hebung

Die Aufhebungsart kann mechanisch oder konvektiv sein. Mechanische Hebung tritt auf, beispielsweise durch Strömung über ein Gebirge (siehe dazu Abschnitt 2.2.4), bei Kaltluftausflüssen von Gewitter und Kaltfronten.

Die konvektive Hebung, kann thermisch über die tageszeitlich bedingte Erwärmung durch Sonneneinstrahlung erfolgen. Durch die tageszeitlich abhängige Sonneneinstrahlung wird die Luft in der unteren Schicht soweit erwärmt, bis irgendwann die Temperatur erreicht

---

<sup>1</sup><http://de.wikipedia.org/wiki/Blitz>

ist (Auslösetemperatur) ab der die erwärmten Luftkörper Auftrieb erhalten und konvektiv in die Höhe steigen. Voraussetzung für Cumulonimbus Wolken ist, dass oberhalb des Kondensationsniveaus keine weiteren Sperrschichten wie zum Beispiel Inversionen (Erwärmung mit der Höhe) auftreten. Ansonsten werden sich nur sogenannte Schönwetterwolken bilden. Dies ist oft bei Hochdruckwetterlagen der Fall, wenn die Luft großräumig absinkt und sich dabei erwärmt (Absinkinversion).

Trotz der unterschiedlichen Möglichkeiten von Hebung wie weiter oben erwähnt, bleibt der Vorgang, was mit einem Luftpaket passiert wenn es gehoben wird gleich.

Ein feuchtes Luftpaket wird trockenadiabatisch<sup>2</sup> gehoben. Es kühlt dabei mit 1 Kelvin (K) pro 100 Meter (m) ab, bis seine Temperatur die Taupunkttemperatur erreicht. Dieses Niveau nennt man Hebungs-kondensationsniveau (HKN). Bei weiterer Hebung über das HKN kondensiert der überschüssige Wasserdampf zu Wolkentröpfchen. Dabei wird Kondensationswärme frei (Latente Wärme), die die Luft im Paket erwärmt. Die feuchtadiabatische Temperaturabnahme<sup>3</sup> ist kleiner als die trockenadiabatische. Das Luftpaket kann demzufolge durch die zusätzliche Kondensationswärme weitersteigen.

### 2.2.2 Labilität

Die Atmosphäre ist labil geschichtet, wenn sich warme Luft in unteren und kalte Luft in höheren Schichten befindet. Diese Labilisierung wird verursacht durch die Dichteunterschiede der Luft, da warme Luft eine geringere Dichte als kalte Luft hat. Daraus resultiert eine nach oben gerichtete Auftriebskraft, die das Gleichgewicht und somit eine Stabilisierung wieder herzustellen versucht.

Die Auftriebskraft ist durch Temperaturunterschiede:

$$\sigma = g \frac{T_p - T_e}{T_e}$$

$T_p$  : die Temperatur des Luftpakets

$T_e$  : die Temperatur der Umgebungsluft

$g$  : Schwerebeschleunigung (beträgt in mittleren Breiten etwa  $9.81 \frac{m}{s^2}$ )

Für

- $T_p > T_e \Rightarrow$  Luftpaket steigt auf
- $T_p < T_e \Rightarrow$  Luftpaket sinkt
- $T_p = T_e \Rightarrow$  Luftpaket ortsfest

---

<sup>2</sup>ohne Wärmezufuhr von außen und ohne Mischung mit der Umgebungsluft

<sup>3</sup>Temperaturabnahme in gesättigter Luft, beträgt in sehr warmer Luft 0.4K pro 100m in mittleren Breiten in der unteren Troposphäre 0.6K pro 100m und nähert sich bei sehr tiefen Temperaturen 1K pro 100m.[Goler, R., SoSe 2006]

Alle Vorgänge, die die Temperaturgegensätze zwischen den oberen und unteren Schichten der Troposphäre vergrößern, sorgen für eine zunehmende Labilität der vertikalen Schichtung.

Für Gewitter braucht man für die ganze Troposphäre  $T_p > T_e$ .

Es gibt ein paar Maßnahmen für die  $T_p > T_e$  ist, einige Parameter zur Bestimmung der Labilität werden im folgenden kurz vorgestellt.

**Convective Available Potential Energy (CAPE) und Convective Inhibition (CIN)** Wenn Luft bis zum Hebungskondensationsniveau (HKN) gehoben wird, dann ist jenes Niveau erreicht, wo Wolkenbildung stattfinden kann. Es sagt aber alleine noch nicht aus, ob dies überhaupt möglich ist. Damit sich auch höher reichende Wolken bilden können, muss das Niveau der freien Kondensation (Level of Free Convection = LFC)<sup>4</sup> erreicht werden.

CAPE ist ein Maß der für Konvektion zur Verfügung stehenden Auftriebsenergie und wird in der Einheit Joules pro Kilogramm (J/kg) angegeben. Die potentielle Energie steht in direkter Relation mit der vertikalen Auftriebsgeschwindigkeit. Demzufolge zeigen höhere Werte ein größeres Potential für schwere Gewitter an.

Beobachtete Werte in Umgebungen von Gewittern erreichen häufig CAPE Werte bis zu 1000 J/kg, in extremen Fällen auch über 5000 J/kg, wobei der Wert stark Klimazonen abhängig ist. Je näher man sich am Äquator befindet um so höher reichen die CAPE Werte im Durchschnitt [Riemann-Campe, et al., 2009].

Damit CAPE und andere Parameter hilfreiche Indikatoren für Gewittervorhersagen sind, müssen statistische Beziehungen der Parameter bei Gewittern bestimmt werden. Solche Eigenschaften wurden unter anderen in der Schweiz [Huntrieser, et al., 1997], in Nordost Colorado [Schultz, 1989], in Zypern [Jacovides und Yonetani, 1990] und in den Niederlanden [Haklander, Van Delden, 2003] durchgeführt. Die Tabelle 1 zeigt CAPE Werte in Abhängigkeit der Gewitteraktivität, die nach [Haklander, Van Delden, 2003] für die Niederlande ermittelt wurden.

CAPE lässt sich aus einem Radiosondenaufstieg grafisch auf einem thermodynamischen Diagramm darstellen und berechnen (Siehe Abbildung 2).

Gewitteraktivität:	heftige Gewitter	Gewitter vorhanden	keine Gewitter vorhanden
Durchschnittliche CAPE Werte [J/kg]:	4427	361	63

Tabelle 1: Zeigt die durchschnittlichen CAPE Werte, bei einer Messung in den Niederlanden. Die erste Spalte, zeigt CAPE Werte für sehr starke Gewitteraktivität. Die mittlere Spalte, die repräsentierenden CAPE Werte, falls es Gewitter gab und die letzte Spalte, zeigt CAPE Werte falls keine Gewitter aufgetreten sind.

<sup>4</sup>ist das Niveau, ab der die Umgebungsluft kälter ist als das Luftpaket und somit weiter aufsteigen kann.

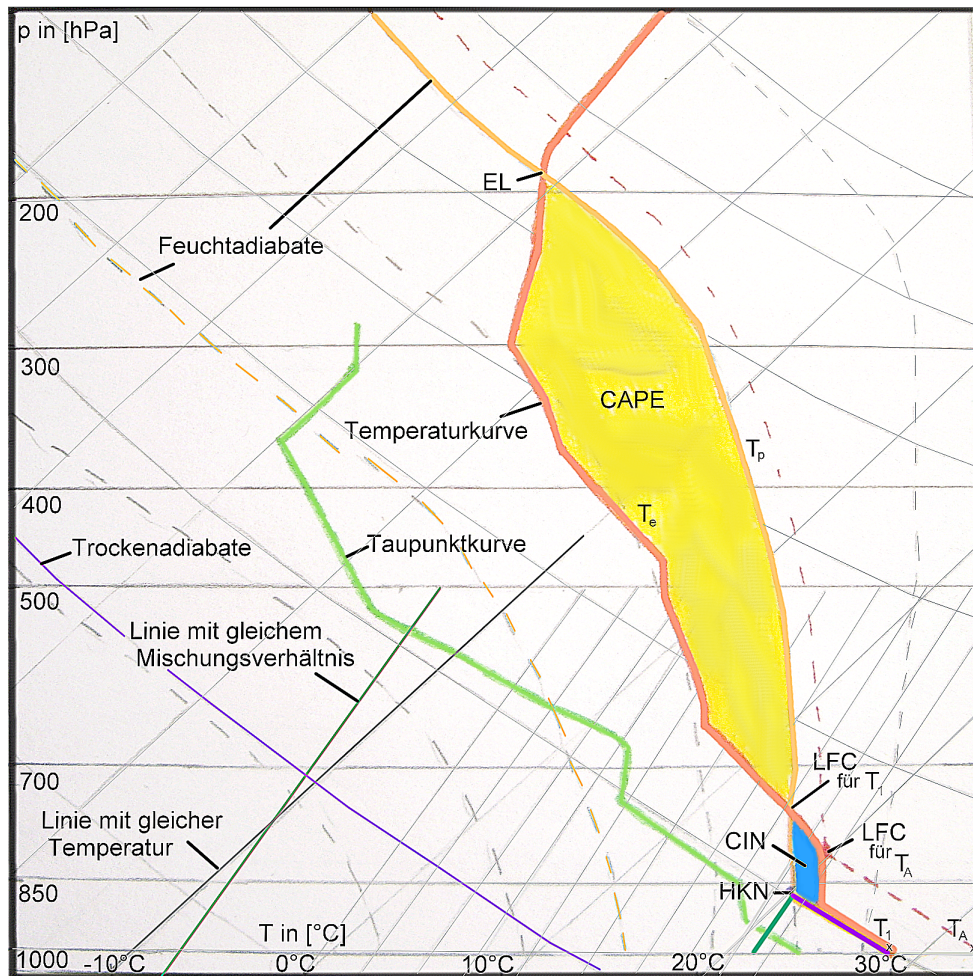


Abbildung 2: Ein selbsterstelltes Skew T- Diagramm mit eingezeichnetem möglichen Verlauf eines Radiosondenaufstieges. Die Höhenachse ist der abnehmende Luftdruck in hPa, die horizontale Achse die Temperatur in °C. Die Linien gleicher Temperatur sind geneigt.

Die abgebildete Fläche mit gelber Füllfarbe auf dem Skew T- Diagramm zwischen der Temperatur des Luftpakets ( $T_p$ ) und der Temperatur der Umgebung ( $T_e$ ) (mit  $T_p > T_e$ ), heißt *Convective Available Potential Energy* (CAPE). Sie existiert dort, wo aufsteigende Luft wärmer ist als die Umgebungsluft, genauer gesagt in dem “Level of free Convection” (LFC) in der instabilen Schicht innerhalb der Troposphäre.

CAPE ist definiert als die positive Temperaturdifferenz zwischen der Temperatur eines Luftpakets und seiner Umgebung zwischen zwei Höhenniveaus, multipliziert mit der Gaskonstante  $R_d$  für trockene Luft [Emmanuel, 1994].

$$CAPE = \int_{P_{LFC}}^{P_{LNB}} R_d (T_{vp} - T_{ve}) d \ln(p)$$

Da die Feuchtigkeit ebenfalls berücksichtigt werden muss, wird die virtuelle Temperatur  $T_v$  verwendet.

$p$  : Druckniveau

$T_{vp}$ : virtuelle Temperatur des Luftpakets



$T_{ve}$ : virtuelle Temperatur der Umgebung

$LFC$ : Level of free Convection,

$LNB$ : Level of Neutral Buoyancy oder auch Equilibrium Level (EL), Niveau des thermischen Gleichgewichtes. Die Temperatur des Luftpakets befindet sich im Gleichgewicht mit der Temperatur der Umgebungsluft. Der positive Auftrieb verschwindet.

$R_d$ : allgemeine Gaskonstante für trockene Luft

Falls sich eine stabile Schicht zwischen der Oberfläche (SFC:surface) und dem LFC befindet (zum Beispiel eine Inversionsschicht), führen hohe Werte von CAPE nicht unbedingt zu hochreichender Konvektion. Das Luftpaket muss über diese stabile Schicht erstmal hinauskommen. Die Intensität der stabilen Schicht wird als CIN (Convective Inhibition) definiert (blaue Fläche in Abbildung 2). Der Temperaturunterschied zwischen Luftpaket und Umgebungsluft wird gleichermaßen wie bei CAPE berechnet, nur die Höhenniveaus gehen bei CIN von der Oberfläche (SFC) aus bis zum LFC [Williams und Renno, 1993].

$$CIN = \int_{P_{SFC}}^{P_{LFC}} R_d(T_{ve} - T_{vp}) d \ln(p)$$

CIN beschreibt die Energie die ein Luftpaket braucht, um das LFC zu erreichen und somit die von da an zur Verfügung stehende Energie zu nutzen damit Konvektion beginnt.

Diese Energie bekommt das Luftpaket zum Beispiel durch thermische oder mechanische Hebung. In Abbildung 2 haben wir bei  $T_1$  ein Luftpaket das bei einer Hebung noch eine Kapinversion<sup>5</sup> aufweist und deshalb noch keine Konvektion auslösen kann. Erst durch solare Erwärmung wird irgendwann im Laufe des Tages eine so hohe Temperatur ( $T_A$ =Auslösetemperatur) erreicht, dass das LFC problemlos erreicht wird und Konvektion einsetzt.

Es gibt andere Methoden um die Labilität der Atmosphäre zu bestimmen.

**Lifted Index (LI)** Ein Luftpaket wird vom Boden entlang der Trockenadiabate bis zum LFC gehoben und dann feuchtadiabatisch weiter bis zum 500 hPa Niveau. Die Temperaturdifferenz Unterschiede zwischen dem Luftpaket und der Umgebungsluft bei einem Höhenniveau von 500 hPa wird als Lifted Index (LI) bezeichnet.

$$LI = T_{e500} - T_{p_{sfc} \rightarrow 500}$$

Ist das gehobene Luftpaket kälter als seine Umgebungsluft bei 500 hPa, resultiert dies in einem positiven LI Wert. Es gibt demnach negativen Auftrieb und das Luftpaket wird absinken.

Ist aber das Luftpaket wärmer als die Umgebung in 500 hPa, so bekommt man einen negativen LI Wert und es gibt positiven Auftrieb, das Luftpaket steigt also weiter nach oben.

Die Einteilung der Werte von LI in Bezug zur Gewitteraktivität wird in Tabelle 2 gezeigt.

---

<sup>5</sup>Eine Schicht mit relativ warmer Luft oberhalb, die die Entwicklung von Gewittern unterdrückt oder verhindert. Ein Luftpaket das in diese Schicht aufsteigt, wird kälter als die Umgebung und kann nicht weiter steigen.

LI(°C)	Aktivität
>0	hochreichende Konvektion unwahrscheinlich
0 bis -2	nur vereinzelt Gewitter möglich, Schauer möglich
-2 bis -5	mäßige Gewitterneigung, verbreitet Schauer
< -6	heftige Gewitteraktivität

Tabelle 2: Der Parameter LI und seine Einstufung im Bezug zu Gewitteraktivität, nach [Goler, R., SoSe 2006].

**Total Totals (TT)** Das Total Totals ist eine Kombination von zwei Labilitätsindices.

$$TT = VT + CT$$

mit

$$VT = T_{850} - T_{500}$$

$VT$ : “Vertical Totals”, zeigt an wie labil die Schichtung zwischen 850 hPa und 500 hPa ist.

$T_{850}, T_{500}$  : Sind die gemessenen Temperaturen des Radiosondenaufstiegs in einer Höhe von 850 hPa beziehungsweise von 500 hPa.

$$CT = T_{d850} - T_{500}$$

$CT$  : “Cross Totals”, sagt aus wieviel Feuchtigkeit es gibt.

$T_{d850}$ : ist die Taupunkttemperatur im 850 hPa Niveau.

Für TT ergibt sich somit:

$$TT = T_{850} + T_{d850} - 2T_{500}$$

Der Vorteil an TT ist, dass man es direkt von der Radiosondenmessung berechnen kann und nicht erst ein Luftpaket heben muss.

Übliche Werte von TT im Bezug zur Gewitteraktivität sind in Tabelle 3 aufgeführt.

TT	Aktivität
<45	hochreichende Konvektion unwahrscheinlich
46 bis 50	nur vereinzelt Gewitter möglich, Schauer möglich
51 bis 55	mäßige Gewitterneigung, verbreitet Schauer
>55	heftige Gewitteraktivität

Tabelle 3: Total Totals (TT), zeigt die entsprechenden Gewitteraktivitäten bei gegebenen TT Wert, nach [Goler, R., SoSe 2006].

**Bulk Richardson Number (BRN)** Die Bulk Richardson Number ist eine dimensionslose Zahl, die die potentielle Auftriebsenergie (CAPE) zu kinetischer Energie (der Windscherung zwischen tiefen und mittleren Höhengniveaus der Troposphäre) in Beziehung setzt, welche eine entscheidende Rolle bei der Entstehung, Entwicklung und Organisation von Gewitter tragen.

$$Ri_b = 2 \frac{CAPE}{(v_l - v_m)^2}$$

(Nach [Hannesen, R., et al., 1998])

$v_l, v_m$  : Die Windvektoren, die sich auf den Wind in unterem ( $l$ : low) und mittleren ( $m$ : middle) Höhengniveau beziehen.

Liegt der Wert von BRN zwischen 15 und 45, wird das in Verbindung mit der Entwicklung von Superzallengewitter gesetzt. [Weisman, M. L., und Klemp, J. B., 1986]

Liegt der BRN- Wert über 50, so bedeutet dies ein hoher CAPE Wert, aber relativ schwache vertikale Windscherung. Meist deutet das auf die Entwicklung von Multizellengewitter hin.

Liegt der Wert unter 15, existiert eine starke vertikale Windscherung und eine schwacher CAPE- Wert. In diesem Fall kann die Scherung zu stark sein um den schwachen Auftrieb eine kontinuierlichen Auftrieb zu geben.

Die erwähnten Parameter geben eine recht gute Abschätzung, ob die Atmosphäre labil geschichtet ist und sind somit ein gutes Maß für die Wahrscheinlichkeit von Gewitter. Allerdings gibt es viele Situationen in denen die einzelnen Parameter nicht richtig repräsentiert werden, sodass es sinnvoll ist, immer ein Bezug zum ganzen Radiosondenaufstieg zu haben und damit mehrere Parameter zu betrachten.

### 2.2.3 Feuchte

Allein durch Hebung und Labilität ist die Entstehung von Gewittern noch nicht gegeben. Erst wenn genügend Feuchtigkeit, vor allem in den unteren und mittleren Schichten der Atmosphäre zur Verfügung steht, kann Wasserdampf kondensieren und es können sich Wolken bilden. Dabei gilt je höher die Taupunkte sind, desto niedriger liegt das Kondensationsniveau und desto schneller verflüssigt sich der in der Luft enthaltene Wasserdampf. Wenn die Feuchtigkeit kondensiert, wird Wärme an die Luft abgegeben (siehe "feucht-adiabatische Temperaturabnahme" in Abschnitt (2.2.1)).

Ein für Gewitterbildung bedeutender Feuchteparameter ist der Spread.

**Spread** Die Differenz zwischen der Umgebungstemperatur und Taupunkt in einer Höhe von 850 hPa nennt sich Spread. Wenn der Wert von Spread relativ klein ist, bedeutet das, dass die Luft sehr feucht ist, was ein guter Indikator für Gewitterbildung ist. Damit eine ausreichende Feuchte für Gewitterbildung gegeben ist, sollte der Spread Wert maximal bei 17° C liegen.

### 2.2.4 Orographischer Effekt

Die Effekte von Gebirgen auf Gewitterbildung werden hier gesondert betrachtet, weil die Orographie in dem Beobachtungsgebiet einen großen Einfluss hat.

Nach [Banta, R. M., 1990] gibt es zwei Haupteffekte die Gebirge auf Gewitter beziehungsweise Wolkenbildung haben.

Gebirge stellen ein Hindernis für atmosphärische Strömung dar. Wenn sich eine stabile Luftströmung einer Gebirgsbarriere nähert, wird diese gezwungen aufzusteigen. Bei günstigen atmosphärischen Bedingungen können sich schließlich Wolken und Gewitter aufgrund der gezwungenen orographischen Hebung der Luft bilden. Dabei bestimmt die Stabilität der Atmosphäre wie das Hindernis die Strömung beeinflusst. Ist zum Beispiel die Schicht sehr stabil, wird die Strömung eher um ein Gebirge herum fließen, anstatt das sich vertikale Verlagerung ergeben.

Nach Hannesen, R., et al., 1998 ist es in diesem Fall durch die Ablenkung der Strömung um das Gebirge herum dennoch möglich, dass auf der Lee Seite des Gebirges die Strömung wieder zusammentrifft und eine horizontale Massenkongruenz auslöst, die eine Region von erhöhter Instabilität produziert. (Siehe Abbildung 3, obstacle effects)

Des Weiteren kann ein Gebirge bei einer stabilen Strömung blockierend wirken. Wenn sich die Strömung dem Gebirge nähert, wird sie aufgrund der Blockade verlangsamt. Der bremsende Effekt kann ebenfalls eine horizontale Massenkongruenz auslösen und eine nach oben gerichtete Bewegung verursachen, die sich mit Wolkenbildung bemerkbar macht, bevor der Hang des Gebirges erreicht ist.

Die zweite Hauptrolle, die Gebirge auf Wolkenbildung spielen, ist die erhöhte Erwärmung an Hängen (Siehe Abbildung 3, thermal forcing). Berghänge die viel Sonnenstrahlung bekommen, können sich und die aufliegende Luft deutlich mehr erwärmen als die Luft in Ebenen. Die hohe Einstrahlung begünstigen die Entwicklung von Berg- und Talwinden, sodass sich Kongruenzzonen über den Gebirgskämmen entwickeln. Diese starken Aufwinde können im Falle einer grenschichtnahen Kapinversion das LFC erreichen und somit Gewitter über den Gipfeln bilden. Ein Beispiel zu einer thermisch angeregten Zirkulation mit Bildung einer Kongruenzzone über den Gipfeln während der COPS Messkampagne liefert der Artikel von [Kalthoff, N., et al., 2008].

Nach [Orville, H. D., 1968, Orville, H. D., 1965] stellen Gebirge eine Feuchtequelle dar. Gewöhnlich haben mittelhohe Gebirge eine ausgeprägte Vegetation und somit können sie viel Feuchte halten und auch an den Boden abgeben, [Oke, T. R., 1987]. Durch Verdunstung steigt die Feuchtigkeit in der Atmosphäre über den Berghängen. Die Luft an Berghängen ist somit feuchter als Luft in gleicher Höhe über Ebenen. Dies verursacht einen Auftrieb aufgrund von Dichteunterschieden. Feuchte Luft ist leichter als trockene Luft. Daher kann sich eine bergauf gerichtete Luftströmung ergeben die Konvektion über den Gipfeln verursachen kann.

## 2.3 Arten von Gewittern

In Abhängigkeit von der atmosphärischen Schichtung können aus Konvektionswolken verschiedene Arten von Gewittern entstehen. Dabei lassen sich nach [Smith, R. K. WS 04/05] Luftmassengewitter, Frontengewitter und mesoskalige konvektive Systeme unterscheiden.

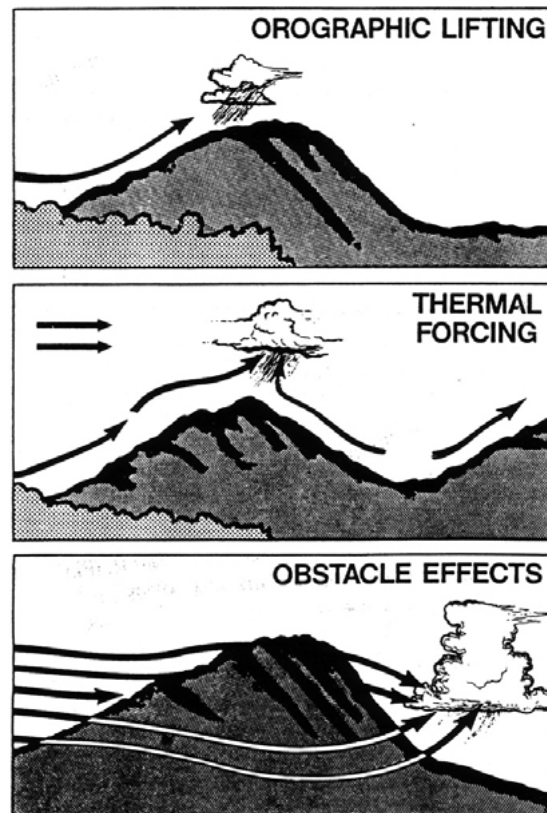


Abbildung 3: Gewitter auslösende Mechanismen im Gebirge , nach [Banta, R. M., 1990]. Eine genaue Beschreibung befindet sich im Abschnitt 2.2.4.

### 2.3.1 Luftmassengewitter

Gewitter entstehen häufig in warmen und feuchten Gebieten. Die Tropen seien hier an erster Stelle erwähnt. Aber auch in den mittleren Breiten treten zumindest im Sommer einige Gewitter auf, wenn warme maritime Luftmassen herangeführt werden [Ludlam, F. H., 1980]. Diese Art von Gewitter nennt man Luftmassengewitter, um sie von Gewittern zu unterscheiden die auf einer anderen Art entstehen, wie zum Beispiel Gewittersysteme mit größerer Ausdehnung die in Verbindung mit synoptischen Störungen stehen. (siehe Frontgewitter Kapitel 2.3.2)

Zu den Luftmassengewitter zählen Wärmegewitter und orographische Gewitter.

**Wärmegewitter:** Wärmegewitter entstehen bevorzugt im Sommer in den Nachmittags und Abendstunden durch tageszeitlich bedingte Aufheizung einer feuchtwarmen Luftmasse über dem Erdboden. Die Wolkenbildung wird über thermische Konvektion ausgelöst. Das bedeutet ein Luftpaket in Bodennähe wird wegen seiner höheren Temperatur und somit geringeren Dichte gehoben. (Siehe konvektive Hebung und Labilität Kapitel 2.2.1 und 2.2.2)

**Orographische Gewitter:** Orographische Gewitter haben ihre Ursache in der erzwungenen Hebung bei Überströmung eines Hindernisses. Sie sind ortsgebunden, da nur am Gebirge das Hebungskondensationsniveau erreicht wird. Manchmal werden Wärmegewitter, die sich infolge der günstigen Einstrahlungsbedingung an Gebirgshängen bilden, eben-

falls als orographische Gewitter bezeichnet [Smith, R. K. WS 04/05](näheres siehe Abschnitt 2.2.4).

Die meisten Luftmassengewitter bestehen aus Einzelzellen. Diese haben eine Lebensdauer von ungefähr einer halben Stunde bis zu einer Stunde.

Jede Gewitterzelle durchläuft in ihrem Lebenszyklus drei Entwicklungsstadien durch.

Im Cumulusstadium (siehe Abbildung 4 (a)) ist das Innere der Zelle wärmer als die Umgebungsluft. Deshalb wirken in der ganzen Zelle Auftriebskräfte. Diese Aufwinde nehmen von den Randzonen zur Mitte hin und von der Basis zum Gipfel der Wolke zu. Neben dem Ansaugen der Luft durch die Basis, strömen zusätzlich durch die seitlichen Begrenzungen der Wolkenzelle große Luftmengen ein, sogenannte Entrainment. Der Gipfel der Wolke hat etwa eine Aufwindgeschwindigkeit von 10 m/s. Sie sorgen für ein großes vertikales Wachstum der Wolke. Aufgrund des hohen Aufwinds können Wolkentropfen noch deutlich über der Nullgradgrenze existieren, was eine große Vereisungsgefahr für Flugzeuge darstellt.

Im Reifestadium (siehe Abbildung 4 (b)) treten neben den Aufwinden auch Abwinde auf. Stärkere Entrainmentzellen in der Wolke bilden durch Verdunstung der Wolkenteilchen und der damit parallel verlaufenden zusätzlichen Abkühlung Kaltluftkörper, welche absinken und Abwindzonen einleiten. Wolkentropfen die inzwischen so groß geworden sind und als Regen abfallen, reißen die Luft durch Reibungskräfte mit nach unten. Der obere Teil der Wolke erreicht im Reifestadium die Tropopause und fließt an den Seiten auseinander. Es bildet sich der typische Cumulonimbus mit Amboss. Sobald Niederschlag aus der ganzen Wolke austritt, beginnen sich Abwinde über der ganzen Wolke auszubreiten.

Im Auflösungsstadium (siehe Abbildung 4 (c)) befindet sich die Wolke sobald Niederschlag aus der ganzen Wolke austritt. Mit dem ausfallenden Niederschlag stürzt Kaltluft zu Boden. Es bilden sich Abwinde, die den Nachschub von energiereicher feuchter Warmluft unterbinden. Die Wolke regnet sich aus und die Wolkenreste verdunsten. Oft bleiben auch von der Ambosswolke entstandene Cirren zurück.

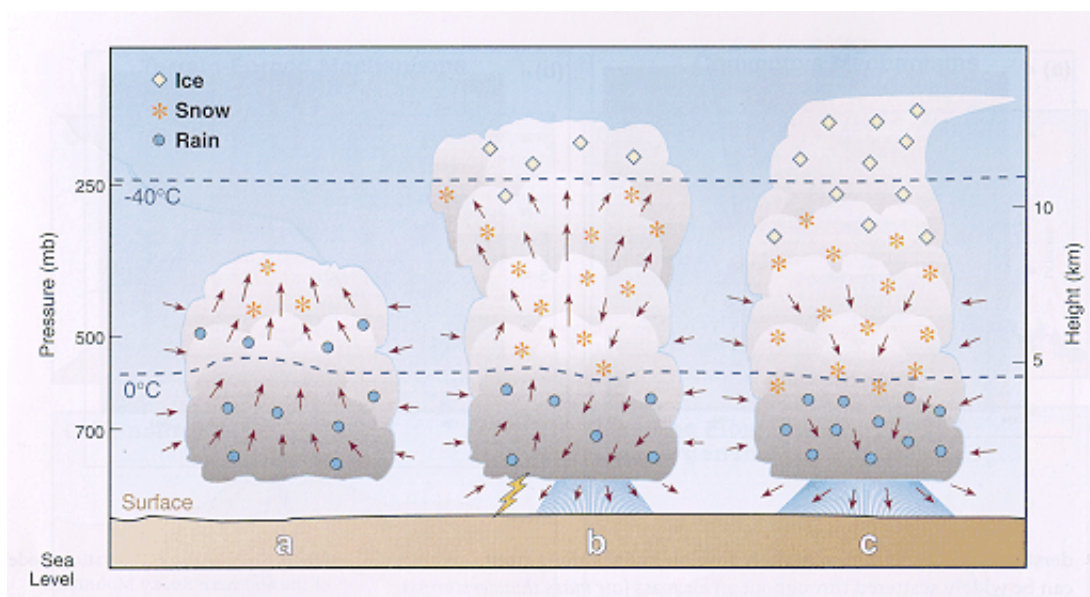


Abbildung 4: Lebenszyklus eines Luftmassengewitters: (a) Cumulusstadium, (b) Reifestadium, (c) Auflösungsstadium.

Bildquelle: <http://www.wrh.noaa.gov/fgz/science/svrwx.php>

Der Grund warum Einzelzellen oft so kurzlebig sind, liegt daran, dass keine vertikale Windscherung vorhanden ist, die die Zerstörung der Aufwinde durch die Abwinde verhindern könnte. Das ist auch ein Grund warum bei Einzelzellen selten Hagel oder starke Winde entstehen. Durch die Zerstörung der Aufwinde, bricht das Wachstum der Niederschlagsteilchen ab.

### 2.3.2 Frontengewitter

Frontengewitter entstehen beim Aufeinandertreffen zweier unterschiedlicher Luftmassen und können im Vergleich zu Luftmassengewitter das ganz Jahr über auftreten. Beim Durchzug einer Kaltfront schiebt sich die kalte Luft unter die warmen Luftmassen. Diese werden zum Aufstieg gezwungen. Der in der Warmluft enthaltene Wasserdampf kondensiert ab einer bestimmten Höhe und es entstehen erste Wolken. Wenn die Grundbedingungen (siehe Kapitel 2.2) für eine Gewitterentstehung da sind, entwickeln sich diese Wolken weiter zu Gewitterwolken. Auslösende Kraft ist hier die Hebelwirkung der kalten Luft. Typisch für alle Frontengewitter ist ihre wesentlich größere Ausdehnung im Vergleich zu Wärmegewittern. Durchschnittliche Werte der Ausdehnung senkrecht zur Frontlinie liegen bei 10 bis 20 km. Entlang der Front sind 100 km keine Seltenheit [Smith, R. K. WS 04/05].

Frontengewitter können an jeder Frontart entstehen. Am häufigsten findet man sie jedoch an Kaltfronten. Warmfrontengewitter können sich nur bilden, wenn die aufgleitende Warmluft schon vorher labil geschichtet war. Normalerweise sind diese aber stabil geschichtet (warme Luft gleitet auf kältere Luft auf).

Für die Intensität von Kaltfrontengewitter ist neben der Hebung, die Feuchte und Labilisierung der vorgelagerten Warmluft entscheidend. Hinter einer Kaltfront kommt es entlang von Troglinien zu Hebungs Vorgängen, die Feuchtekonnektion und auch Gewitter auslösen können.

**Konvergenzlinien:** Konvergenzlinien sind häufig 150 bis 300 km einer Kaltfront vorgelagert und treten besonders in der warmen Jahreszeit auf. Sie bilden sich im Warmluftsektor und entstehen durch das Zusammentreffen warmer sehr feuchter aus Bodennähe stammender Luft mit absteigender, trockender, mitteltroposphärischer Luft oberhalb der Frontalzone [Beheng, K. D., 1998]. Die Luft wird gezwungen aufzusteigen. Entlang der Konvergenzlinie bilden sich oft linienartige Gewitter, bestehend aus der linienförmigen Anordnung von Multizellen, selten auch Superzellen. Die Haupt-Gewitteraktivität findet meistens dort statt und nicht an der nachfolgenden Kaltfront.

### 2.3.3 Mesoskalige Konvektive Systeme

Unter mesoskaligen konvektiven Systemen versteht man schwere Gewitter, die einen weit aus größeren Bereich abdecken als einzelne, isolierte Zellen. Die Rede ist von 30 - 200 km (mesoskaliger Bereich). Konvektive Systeme bestehen meist aus mehreren Gewitterzellen. Häufig werden Multizellen, Superzellen und Squall lines<sup>6</sup> beobachtet. Die Mehrzahl der

---

<sup>6</sup>linienförmig angeordnete Gewitterzellen, treten oft mit schweren Windböen auf. Oftmals charakterisiert durch eine vorderseitige, linienartige Anordnung starker konvektiver Zellen und eine nachfolgende Region mit stratiformen Niederschlag. Häufig zu beobachten in Darwin (Australien), im zentralen Teil der USA und in Deutschland bilden sie sich manchmal an einer Konvergenzlinie vor der Kaltfront.

schweren Gewitter sind mit sintflutartigen Regenfällen, großen Hagelkörnern, hohen Windgeschwindigkeiten und Tornados verbunden. Sie entstehen, wenn die Luft feuchtilabil geschichtet ist und im Unterschied zu Einzelzellen bei einer vertikalen Windscherung [Smith, R. K. WS 04/05]. Dann zerstört sich die Gewitterzelle nicht selbst und kann somit über längere Zeit im Reifestatus verweilen, da ständig neue Zellen gebildet werden.

**Multizellengewitter:** Eine Multizelle besteht aus einer Vielzahl von gekoppelten Einzelzellen, die sich gleichzeitig in unterschiedlichen Entwicklungsstadien befindet. Verantwortlich für die Entstehung von Multizellengewitter sind Windscherungen mit der Höhe die verhindern, dass die Einzelzelle sich durch ihren eigenen Abwind wieder selbst zerstört und deshalb durch die Windscherung verlagert wird und neue Zellen produziert. Die Lebensdauer ist somit mit mehreren Stunden deutlich höher als bei Einzelzellengewitter.

Im Vergleich zu Einzelzellengewitter treten bei Multizellengewitter häufig größere Schäden auf, die in Verbindung mit Hagel stehen können. Aufgrund vieler vorhandener Zellen kann es zu einem Austausch von Partikeln zwischen den verschiedenen Zellen kommen. So können zum Beispiel Graupelteilchen die in den Zellen oberhalb des Einströmbereichs wachsen, in das Zentrum des Gewitters verlagert werden und in den Hauptaufwindbereich gelangen (siehe Abbildung 5). Dort ist auch der Flüssigwassergehalt sehr hoch, sodass die Graupelteilchen zu Hagelkörnern anwachsen können. Danach gelangen sie in den großen Abwindbereich, in welchen sie schnell als Hagel zum Boden ausfallen.

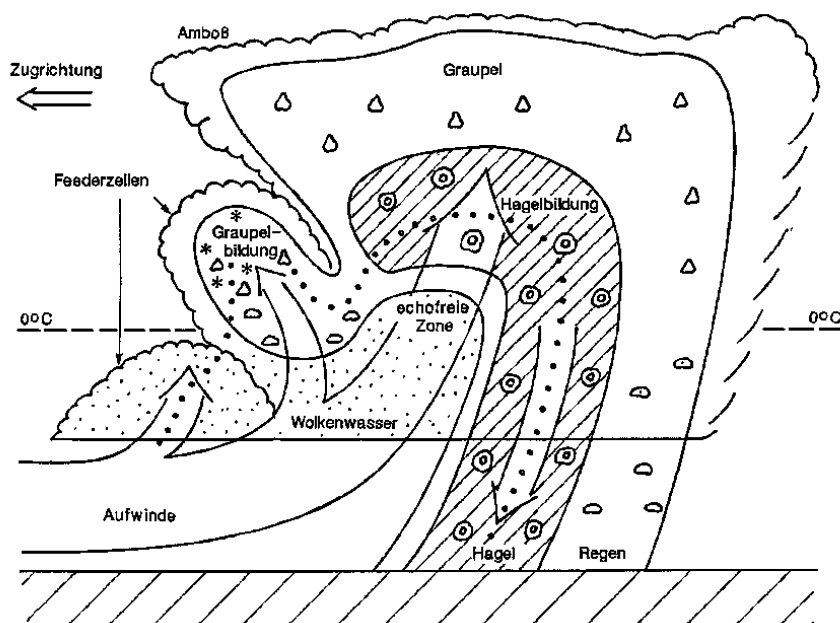


Abbildung 5: Ein Querschnitt durch ein Multizellengewitter. Es sind verschiedene Zellen abgebildet, die sich in verschiedenen Entwicklungsstadien befinden. Graupel wächst in den linken Zellen der Wolke, den sogenannten Feederzellen, die den Nachschub für den Zentrum der Wolke liefern. Im Hauptaufwind im Zentrum der Wolke entsteht Hagel, der im Abwind zu Boden fällt. Die gepunktete Linie stellt den Zyklus eines heranwachsenden Hagelkorns dar, nach [Höller, H. 1994].



**Superzellengewitter:** Superzellengewitter haben dieselbe Ausmaße wie Multizellengewitter, bestehen aber im Gegensatz dazu aus einem riesigen Aufwind- und Abwindbereich wie bei einem Einzelzellengewitter. Entwickeln können sie sich sowohl aus Einzelzellen- als auch aus Multizellengewittern. Voraussetzung, dass sich ein Superzellengewitter bildet, ist wie bei den Multizellengewittern eine vertikale Windscherung mit starker Zunahme mit der Höhe in unteren Niveaus der Troposphäre.

Ein Superzellengewitter ist die langlebigste Form von Gewitterzellen. Sie können mehrere Stunden existieren. Da Superzellen mit großen Hagelschäden verbunden sind und auch Tornados entstehen können, zählen sie zu den gefährlichsten Gewitterzellen.

Ein Querschnitt durch ein Superzellengewitter ist in Abbildung 6 zu sehen.

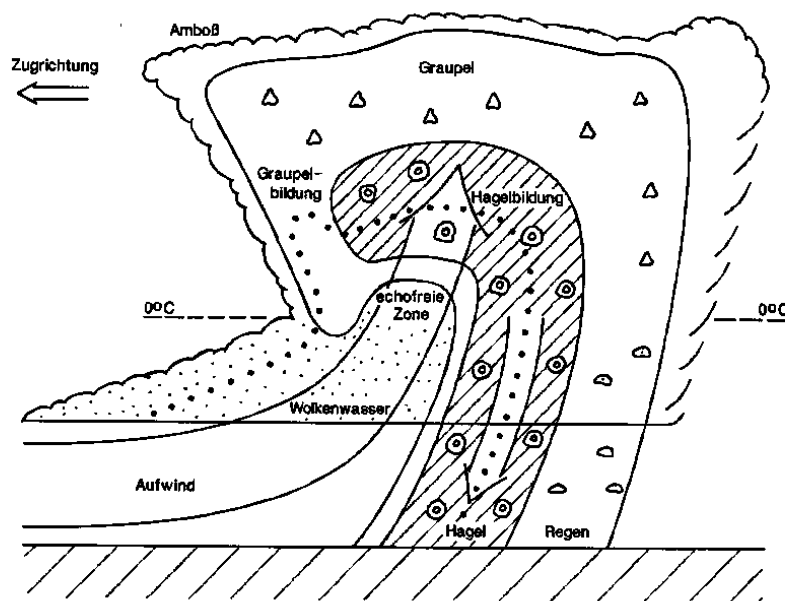


Abbildung 6: Ein Querschnitt durch ein Superzellengewitter. Es existiert nur eine große Zelle, in der alle Abläufe der Hagelbildung stattfinden. Sowie nur ein großer Aufwind- sowie Abwindbereich. Wie bei der Multizelle symbolisiert die gepunktete Linie den Zyklus eines heranwachsenden Hagelkorns, nach [Höller, H. 1994].



## 3 Datengrundlage und Darstellung

Nach der Definition von Gewitter (siehe Abschnitt 2.1) gibt es erwartungsgemäß große Unterschiede im Beobachtungsmaterial, da die Aufmerksamkeit der Beobachter auf den Wetterstationen schon aufgrund kurzfristiger Abwesenheiten vom Beobachtungsort, Nachtruhe oder subjektiver Einschätzung stark voneinander abweicht.

Des Weiteren können aufgrund der Stationsdichte nicht alle Gewitter aufgezeichnet werden, das betrifft besonders die Gebirgsregionen. Es kann passieren, dass Gewitter nicht gehört oder gesehen werden. [Van Delden, 2001] diskutiert viele Faktoren, die einen negativen Einfluss auf die Zuverlässigkeit der Beobachtung von Donner und Blitz haben können.

Eine andere Möglichkeit der Erfassung von Gewittern ist die objektive Registrierung durch ein elektronisches Blitzdetektor System. Welches für diese Arbeit verwendet wurde und in Abschnitt 3.1.2 erläutert wird.

### 3.1 Datenmaterialien

Im folgenden werden alle verwendeten Datenmaterialien die für die Auswertung relevant sind vorgestellt.

#### 3.1.1 Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet umfasst grob gerundet etwa  $280 \times 220 \text{ km}^2$ .

Es beginnt bei  $47.45^\circ$  nördlicher Breite und endet bei  $49.5^\circ$  nördlicher Breite. Die Meridiangrenzen liegen bei  $6.0^\circ$  Ost und  $10.0^\circ$  Ost (Siehe Abbildung 1). Zur Gewitterbildung interessante Regionen aus diesem Gebiet werden kurz dargestellt.

**Der Schwarzwald** Der Schwarzwald ist ein 160 km langes und 60 km breites Mittelgebirge im Südwesten Deutschlands. Er lässt sich unterteilen in den Nordschwarzwald der sehr dicht bewaldet ist, den niedrigeren Mittleren Schwarzwald und den deutlich höheren Südschwarzwald mit ausgeprägter Höhenlandwirtschaft und ein von eiszeitlichen Gletschern geprägtem Relief. Der Feldberg im Südschwarzwald vertritt mit 1493 Metern den höchsten Berg.<sup>7</sup>

**Die Schwäbische Alb** Im Osten des Südschwarzwaldes beginnt die Schwäbische Alb. Ein Mittelgebirge mit einer Länge von 200 km und einer Breite von etwa 40 km. Ausgeprägte Gipfelberge sind eher untypisch. Die höchsten Erhebungen reichen bis knapp über 1000 Meter und sind im südwestlichen Teil der Alb zu finden. Buchenwälder, Wiesen und Wachholderheiden charakterisieren die Vegetation.<sup>8</sup>

---

<sup>7</sup><http://de.wikipedia.org/wiki/Schwarzwald>

<sup>8</sup>[http://de.wikipedia.org/wiki/Schw%C3%A4bische\\_Alb](http://de.wikipedia.org/wiki/Schw%C3%A4bische_Alb)

**Die Vogesen** Die Vogesen im Westen des COPS- Gebiets erreichen im Süden eine Berghöhe von 1400 Meter. Im Norden liegen die maximalen Höhen bei 1000 Meter. Anders als wie im Schwarzwald gibt es in den Vogesen relativ großflächige waldfreie Gipfelbereiche. Das Gebirge erstreckt sich über 125 km Länge und 40 bis 70 km Breite.<sup>9</sup>

Zwischen den Vogesen und dem Schwarzwald verläuft die Oberrheinische Tiefebene. Der Rhein sorgt für Feuchte. Der Föhneffekt aufgrund der angrenzenden Gebirge ist für milde Winter und warme Sommer verantwortlich.

Die folgende Tabelle 4 zeigt eine Übersicht der verwendeten Daten, die für die Analyse der Eigenschaften von Gewittern nützlich waren.

### 3.1.2 Blitznetz

Eine Möglichkeit der Erfassung von Gewittern ist die objektive Registrierung durch ein elektronisches Blitzerfassungssystem.

Ein Blitz, der in die Erde einschlägt oder von Wolke zu Wolke stattfindet, sendet elektromagnetische Wellen aus, die sich hunderte Kilometer weit ausbreiten. An der Charakteristik dieser Wellen ermitteln spezielle Algorithmen in den Messstationen, ob es sich um ein Blitz handelt und können zusätzlich Schlüsse auf Stärke, Art und Polarität geben. Durch gut verteilte Messstationen kann zusätzlich der Ort, Zeitpunkt und die Höhe des Blitzes berechnet werden. Die elektromagnetischen Wellen breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit aus und erreichen so zu unterschiedlichen Zeiten mehrere Messstationen, aus denen dann durch die Differenz der Ankunftszeit der Einschlagsort ermittelt werden kann. Die ganzen Daten der Einzelsensoren werden auf einen großen Rechner zusammengeführt und sind dort abrufbar.

Für eine flächendeckende Erfassung von Gewittern wurde daher für den Zeitraum von 1998 bis 2006 auf den Blitzdatensatz vom Deutschen Wetterdienst (DWD) zurückgegriffen, ab 2007 stand der Blitzdatensatz von Nowcast zur Verfügung.

Die Blitzdaten vom DWD (1998 bis 2006) wurden über das DLR<sup>10</sup> genutzt. Die Daten liegen im Binär- ASCII Format vor und umfassen ganz Europa mit halbstündigen Aufzeichnungen.

Die Blitzdaten von Nowcast (2007 bis 2008) standen dem DLR aufgrund der COPS - Messkampagne ebenfalls zur Verfügung. Das Format der Daten liegt binär und als NetCDF Files vor.

Die Rohdaten enthalten Informationen über den Ort des Blitzeinschlags, die Zeit, die Art des Blitzes (ob er negativ oder positiv gepolt ist), sowie die Höhe des Blitzereignisses und die Einteilung ob es ein Wolke-Boden Blitz oder Wolke-Wolke Blitz war.

Mit der Programmiersprache IDL<sup>11</sup> wurden innerhalb dieser Arbeit Programme erstellt, die die halbstündigen Daten einlesen und einen zeitlichen Tagesverlauf aller Blitze im Untersuchungsgebiet bildlich darstellen. Somit werden für den gesamte Untersuchungszeitraum Mai bis August von 1998 bis 2008 alle Tage an denen es ein Gewitter im Untersuchungsgebiet gibt ausfindig gemacht. In Abbildung 7 befindet sich ein Beispiel der bildlichen Darstellung der Blitzverteilungen innerhalb eines Tages.

---

<sup>9</sup><http://de.wikipedia.org/wiki/Vogesen>

<sup>10</sup>Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

<sup>11</sup>Interactive Data Language

Datenmaterial	Herkunft	Format	Zeit	Infos
Blitz - Daten	1998-2006 vom DWD, (übers DLR) 2007-2008 von Nowcast, (übers DLR)	Binär/ ASCII	kontinuierlich	Gewittertage, Entstehungszeit/-ort Gewitterart
RADAR - Daten	1998-2008 von DWD-Komposit, (übers DLR)	Binär	alle 15 min	Entstehungszeit/-ort, Zugrichtung, Gewitterart
Bodenanalyse	1998-2003 UKMO, <a href="http://www.wetterzentrale.de">www.wetterzentrale.de</a> 2004-2008 DWD, <a href="http://www.wetter3.de">www.wetter3.de</a>	(Grafik)	täglich 00:00 (UTC)	Druckgebilde(H,T), Fronten, Konvergenzlinien
Radiosondenaufstiege (Stuttgart, Nancy)	1998 bis 2008 University of Wyoming, <a href="http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html">weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html</a>	(Grafik)	täglich 12:00 (UTC)	Windrichtung, Windgeschwindigkeit, CAPE,CIN,LI,TT,spread

Tabelle 4: Eine Übersichtstabelle der zur Verfügung stehenden Daten. Mit Information über Herkunft, Format, Produktionsrate und daraus erhaltenen Informationen

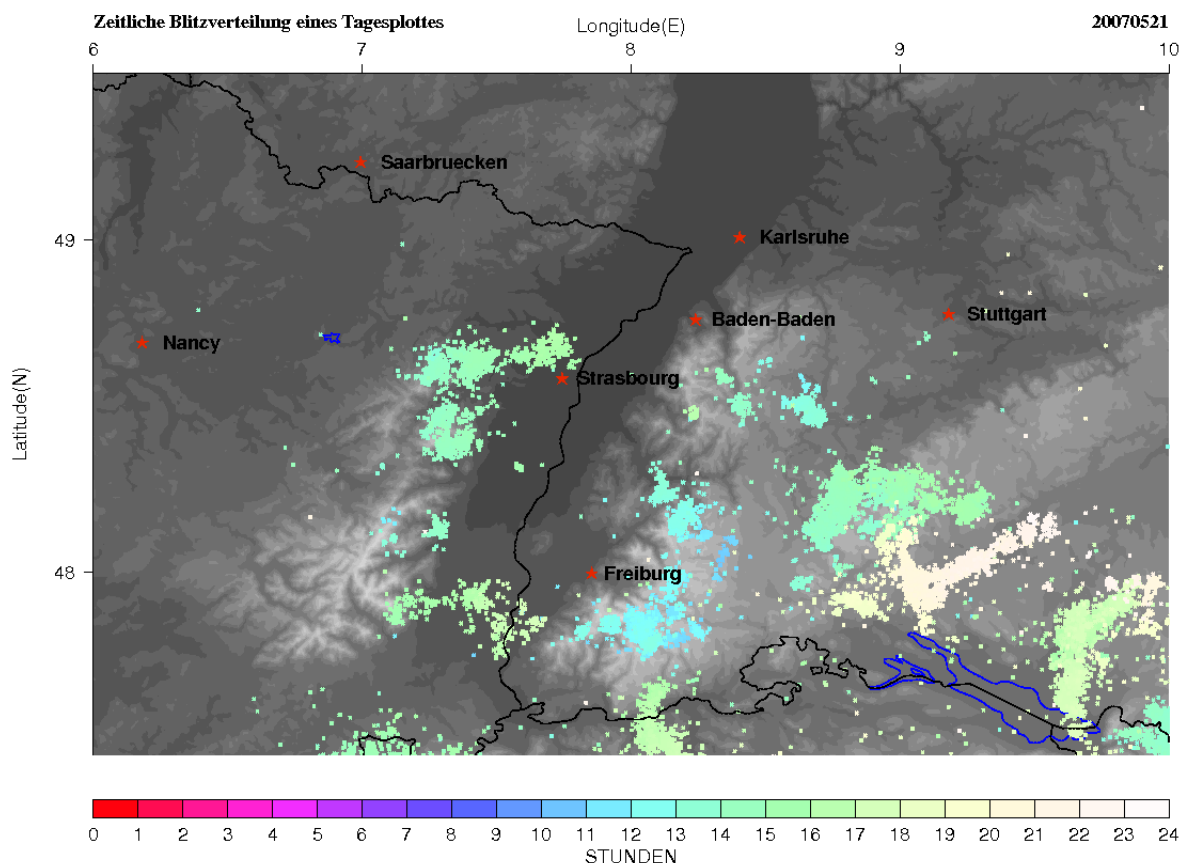


Abbildung 7: Ein Beispiel der bildlich dargestellten, zeitlichen Blitzverteilung vom 21. Mai 2007 von 00:00 Uhr bis 23:59 Uhr im COPS Gebiet. Das Gebiet wird topografisch durch verschiedene Graustufen dargestellt. Die schwarze Linie kennzeichnet die Ländergrenzen. Die blauen Linien stellen Seen dar. Die bunten Punkte markieren Wolke zu Boden Blitze. Die entsprechende Zeit wird durch einen farblichen Balken dargestellt.

Aus der bildlichen Darstellung der Blitze wird ersichtlich, zu welcher Zeit Gewitter auftreten, wo sie sich befinden, ob es sich um langlebige Gewitter handelt oder nur welche mit kurzer Lebensdauer. Somit lassen sich die Gewitter auch in ihrer Art recht gut einteilen. Zur besseren Abschätzung werden aber auch noch andere Daten betrachtet, um die Beobachtungen der Blitzdaten zu bestätigen und weitere Informationen wie z.B. die Zugrichtungen von Gewitter zu bekommen.

### 3.1.3 RADAR DWD Komposit

Eine recht gute Möglichkeit zur Beobachtung von Gewittern ist das RADAR. RADAR steht für Radio Detecting And Ranging (Erkennung und Entfernungsbestimmung mit Radiowellen). Durch aussenden gepulster elektromagnetischer Strahlung und Analyse zurückgestreuter Signale werden Intensitäten, Entfernung sowie Richtung von Zielobjekten bestimmt [Rinehart, R. E., 1991]. Die Reflektivität ist ein Maß für den Rückstreuquerschnitt von Zielen, die mit RADAR detektiert werden können [Beheng, K. D., 1998]. Sie hängt von den Eigenschaften der Ziele ab. Bei Regen ist sie umso größer, je mehr und je größer die Regentropfen sind. Die Reflektivität wird meist in der logarithmischen Einheit dBZ angegeben. Dabei steht dB für Dezibel und Z steht für die Reflektivität.

Verwendet wurde für den Zeitraum von 1998 bis 2008 das Nationale Kompositbild (PC) vom Deutschen Wetterdienst. Dargestellt werden ganz Deutschland sowie angrenzende Nachbargebiete. Nach [Schreiber K. J. 1998] beinhaltet das PC- Produkt die bodennahe Radarreflektivitätsverteilung in einer logarithmischen, sechstufigen Farbskala (dBZ-Werte) mit entsprechenden Intensitätsklassen, die in Tabelle 5 aufgelistet sind. Ein Pixel der Radarreflektivität auf dem Kompositbild entspricht einer Fläche von 4 km x 4 km. Die Erstellung der Kompositprodukte erfolgt durch eine Überlagerung von einzelner lokalen Radarbilder. Das ganze Nationale Kompositbild erscheint für die Auswertung sehr groß, durch die Radarstationen auf dem Feldberg und in Neu Heilenbach ist somit jedoch eine komplette Abdeckung des COPS Gebietes gegeben. Mit einem erzeugten Programm wurde der Radarausschnitt auf das ganze COPS- Gebiet beschränkt und macht dadurch die Betrachtung von Niederschlagsgebiete leichter.

Nach Schiesser et al., 1995 können verschiedene Reflektivitätswerte im Bezug zu Gewittern klassifiziert werden. Demnach wird ein umhülltes Gebiet auf dem Radarplot als Gewitterzelle definiert, sobald sie einen Reflektivitätswert von 47 dBZ aufweist. Übertrifft dieser Wert die Schwelle von 55 dBZ, kann sogar von davon ausgegangen werden, dass in der Gewitterzelle Hagel auftritt. Mit dieser Erkenntnis, lassen sich nun Informationen über die Entstehungsorte, Entstehungszeiten von Gewitterzellen herausfinden, sowie bei der Betrachtung von aufeinander folgenden Radarbildern die Zugrichtungen von Gewittern und grob auch die Gewitterart bestimmen. Wenn höhere Reflektivitätswerte entlang einer größeren Linie auftreten und diese mit geringeren Reflektivitätswerten verknüpft sind, kann man davon ausgehen, dass es sich um ein mesoskaliges konvektives System handelt. Wenn vermehrt umhüllte Gebiete mit hohen Reflektivitätswerten auftreten, die aber isoliert erscheinen, so handelt es sich mit größerer Wahrscheinlichkeit um Luftmassengewitter (siehe Abbildung 8).

Stufe	Intensitätsklasse
0	<7 dBZ
1	7-19 dBZ
2	19-28 dBZ
3	28-37 dBZ
4	37-46 dBZ
5	46-55 dBZ
6	>55 dBZ

Tabelle 5: Einordnung der Radarreflektivität in Klassen, nach [Schreiber K. J. 1998], die unter anderem in Abbildung 8 im Farbbalken angegeben sind.

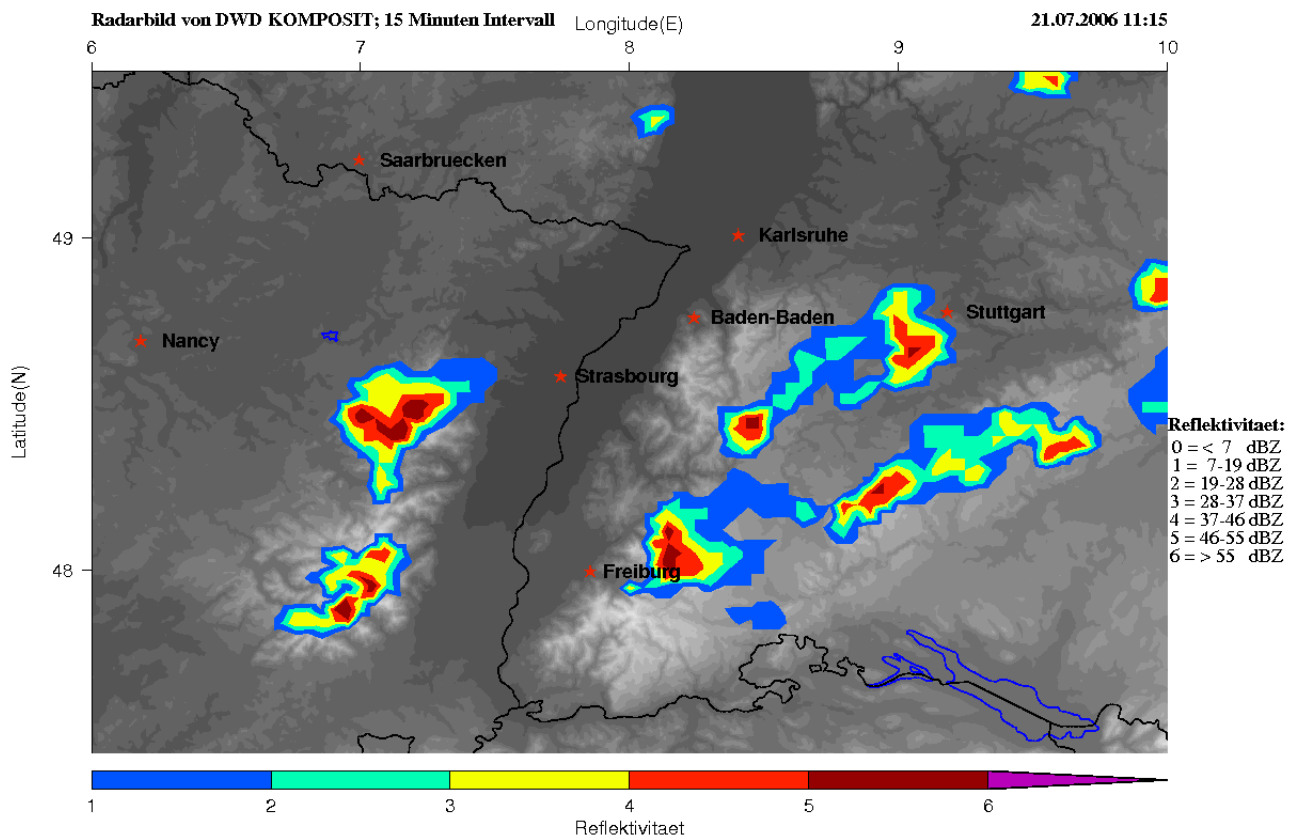


Abbildung 8: Ein Beispiel des mit IDL erzeugten, bildlichen RADAR Komposits. Die Abbildung zeigt einen Ausschnitt aus dem PC Produkt für das COPS Gebiet. Die Aufnahme ist von 11:15 UTC, am 12.07.2006. Die unterschiedlichen Farbbereiche kennzeichnen die Stärke der Reflektivität in dBZ.

### 3.1.4 Bodenwetterkarten

Zur Analyse von Gewitterarten wurden unter anderen Bodenanalysekarten hinzugezogen. Auf den Bodenwetterkarten sind Fronten (Kaltfront, Warmfront, Okklusion) sichtbar, sowie mögliche Konvergenzlinien vor den Fronten. Informationen über die Druckverhältnisse am Boden sind ebenfalls ersichtlich. Daraus lassen sich gut Aussagen treffen, ob es sich bei einem Gewitter um ein Frontgewitter handelt oder um ein Luftmassengewitter.

Leider stehen in den meisten Fällen nur tägliche Bodenanalysen von 00:00 UTC zur Verfügung, sodass, falls eine Front in der Karte angezeigt wird, nicht eindeutig ersichtlich ist, ob die aufgetretenen Gewitter tatsächlich zur Front dazu gehören oder nicht. Daher ist nur eine Abschätzung möglich. Um die Zeiten der Frontdurchgänge dennoch besser lokalisieren zu können, werden die Bodenwetterkarten noch mit Radarbildern verglichen.

Des Weiteren ist anzumerken, dass durch den Betrachtungszeitraum von 11 Jahren Bodenwetterkarten von unterschiedlichen Anbietern verwendet wurden. Von 1998 bis 2003 wurden die Analysekarten von UKMO (Bracknell)<sup>12</sup> verwendet. Ab 2004 waren die Analysekarten vom Deutschen Wetterdienst verfügbar<sup>13</sup>. Dadurch ergeben sich teilweise unterschiedliche Interpretationen der Karten.

<sup>12</sup><http://www.wetterzentrale.de/topkarten/fsfaxbra.html>

<sup>13</sup>[http://www.wetter3.de/Archiv/archiv\\_dwd.html](http://www.wetter3.de/Archiv/archiv_dwd.html)



### 3.1.5 Radiosondenaufstiege

Um genaue Angaben über die Windverhältnisse in unterschiedlichen Höhengniveaus sowie Informationen über unterschiedliche Gewitterparameter wie CAPE, CIN, LI, TT und BRN zu bekommen wurden Radiosondenaufstiege zur Auswertung hinzugezogen. Innerhalb des Beobachtungsgebietes gibt es zwei Stationen bei denen regelmäßig um 00 Uhr (UTC) und 12 Uhr (UTC), in seltenen Fällen auch um 06 Uhr (UTC) und 18 Uhr (UTC) Radiosondenaufstiege vorliegen. Für die Auswertung wurde soweit wie möglich die Radiosondenaufstiege von 12 Uhr (UTC) genutzt. Die Daten wurden von der University of Wyoming<sup>14</sup> zur Verfügung gestellt. Sie sind unter anderen sowohl grafisch in einem Skew-T Diagramm, als auch in einer Liste abrufbar. Aus den Daten sind Windverhältnisse in verschiedenen Höhen sowie CAPE, CIN, LI, TT und BRN Werte direkt ohne Berechnung verfügbar. Der Feuchteindex Spread wurde zusätzlich durch Berechnung der Differenz zwischen der Temperatur und der Taupunkttemperatur in dem Höhengniveau von 850 hPa bestimmt. Die Windrichtungen wurden für die Höhengniveaus in 850 hPa sowie 500 hPa notiert.

Um eine möglichst gute Abschätzung der Gewittereigenschaften zu bekommen, werden immer alle Datenmaterialien miteinander kombiniert. Teilweise kommt es vor, dass einige Parameter oder Daten eines Tages nicht zur Verfügung stehen. Dann ist besonders wichtig mit Hilfe der anderen Daten die Gewittersituation dennoch möglichst genau zu bestimmen.

---

<sup>14</sup><http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>



## 4 Analyse und Auswertung

**Untersuchungszeitraum** Lufttemperatur (“fühlbare Wärme”) und Wasserdampfgehalt (“latente Wärme”) unterliegen einem akzentuierten Jahresgang mit eindeutigen Winterminimum und Sommermaximum, wodurch der Jahresgang der Gewittertätigkeit mit seinem auffallenden Sommermaximum schon weitgehend erklärt werden kann.

Eine räumliche und zeitliche Verteilung von Blitzen wurde für den Raum Süddeutschland von [Finke, U. und Hauf, T., 1996 a] untersucht. Ein Ergebnis ist der Jahresgang der Blitzhäufigkeit. 95% der detektierten Blitze treten in den Sommermonaten Mai bis August auf siehe [Bartenschlager, B., 1997]. Aufgrund der dadurch höchsten Wahrscheinlichkeit von Gewittern im Sommer wird der Untersuchungszeitraum dieser Arbeit von Mai bis August gewählt.

Die Einteilung der Gewitter wurde auf Tage gesetzt. Dabei spielt es keine Rolle wie viele Gewitter an einem Tag auftreten. Sobald ein Gewitter identifiziert wurde, zählt der Tag als Gewittertag. Daher ist im folgenden bei Erwähnungen von Luftmassengewitter oder Frontengewitter immer die Rede von Gewittertagen.

Es ist anzumerken, dass es sich bei allen angegebenen Zeiten stets um die UTC Zeit handelt.

### 4.1 Häufigkeitsverteilung der Gewittertage

Die Untersuchung erstreckt sich über die Sommermonate der Jahre 1998 bis 2008. Das bedeutet insgesamt über einen Zeitraum von 1342 Tagen. Alle Tage werden mittels der erstellten täglichen Blitzbilder (siehe Abschnitt 3.1.2) analysiert und eingeteilt je nach dem es sich um ein Gewittertag handelt oder nicht und ob die Daten vorhanden beziehungsweise fehlerhaft sind. Damit mögliche Fehlermeldungen der Blitzdaten ausgeschlossen sind und die Eindeutigkeit eines Gewitters gut gegeben ist, müssen mindestens fünf Blitze etwa zur gleichen Zeit in naheliegender Umgebung (grob geschätzt etwa 50 km) registriert sein um einen Tag für das gesamte COPS Gebiet als Gewittertag zu bezeichnen. Oft können zwei oder alle der beschriebenen Gewittertypen gleichzeitig beziehungsweise innerhalb eines Tages im Untersuchungsgebiet auftreten. In diesen Fällen wird jeweils der vorherrschenden Gewittertyp den Vorzug gelassen.

Eine grafische Übersicht der zu untersuchenden Tage befindet sich in Abbildung 9.

Von den insgesamt 1342 Untersuchungstage wurden 530 als Gewittertage eingestuft. An 699 Tagen gibt es keine Gewitter. Von 113 Tagen fehlen die Daten beziehungsweise sind sie fehlerhaft und somit nicht auswertbar. Prozentual gesehen treten folglich an 52% der zu untersuchenden Tage keine Gewitter auf. Um 40% handelt es sich um ein Gewittertag und 8% sind nicht auswertbar.

### 1342 Untersuchungstage im Zeitraum 1998 bis 2008 jeweils von Mai bis August

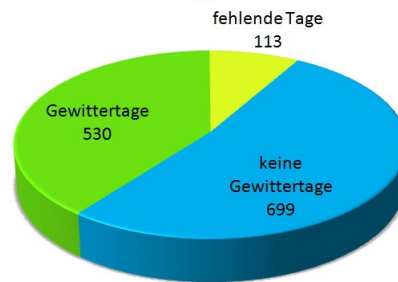


Abbildung 9: Einteilung aller Untersuchungstage in Gewittertage, nicht Gewittertage und nicht auswertbare Tage.

Betrachtet man die Anzahl der Gewittertage pro Jahr jeweils von Mai bis August, so treten teils größere Schwankungen über die Jahre hinweg auf (siehe Abbildung 10 ). Im Mittel gibt es etwa 48 Gewittertage pro Jahr, genauer gesagt pro Sommer. Das entspricht durchschnittlich ungefähr 12 Gewittertage jeweils in den Monaten Mai, Juni, Juli und August, wobei auch hier die einzelnen Monate einigen Schwankungen unterliegen. So beginnt meist erst im Mai die Gewittersaison während sie im Juli den Höhepunkt erreicht und im August die Gewitteraktivität schon wieder abnimmt. In Abbildung 12 befindet sich eine Übersicht über die Anzahl der Gewittertage im Hinblick auf die Monate und Jahre.

### Anzahl der Gewittertage pro Jahr jeweils von Mai bis August



Abbildung 10: Häufigkeitsverteilung aller Gewittertage pro Jahr von 1998 bis 2008.

Eine detaillierte Häufigkeitsverteilung geben die Anzahl der Gewittertage für die einzelnen Monate Mai, Juni, Juli und August, (siehe Abbildung 11). In den Jahren 2006 und 2007 gibt es verhältnismäßig viele Gewittertage. Im Sommer 1998 hingegen relativ wenig. Wobei erwähnt werden muss, dass im Jahre 1998 für den Monat Mai über die Hälfte der Daten fehlen und somit eventuell mögliche Gewittertage für den Monat Mai nicht

mitberücksichtigt wurden. Die Auswertung wurde nur mit Blitzdaten ermittelt. Eventuell wird die Statistik verfälscht durch eine Leistungssteigerung der Blitzmesssysteme. Es ist anzunehmen das beispielsweise durch mehr oder bessere Sensoren oder auch Auswertalgorithmen die Ortungswahrscheinlichkeit zugenommen hat. Dennoch scheint eine Tendenz zu mehr Gewittertagen pro Jahr für wahrscheinlich. Des Weiteren sind die monatlichen Schwankung innerhalb der Jahre erkennbar.

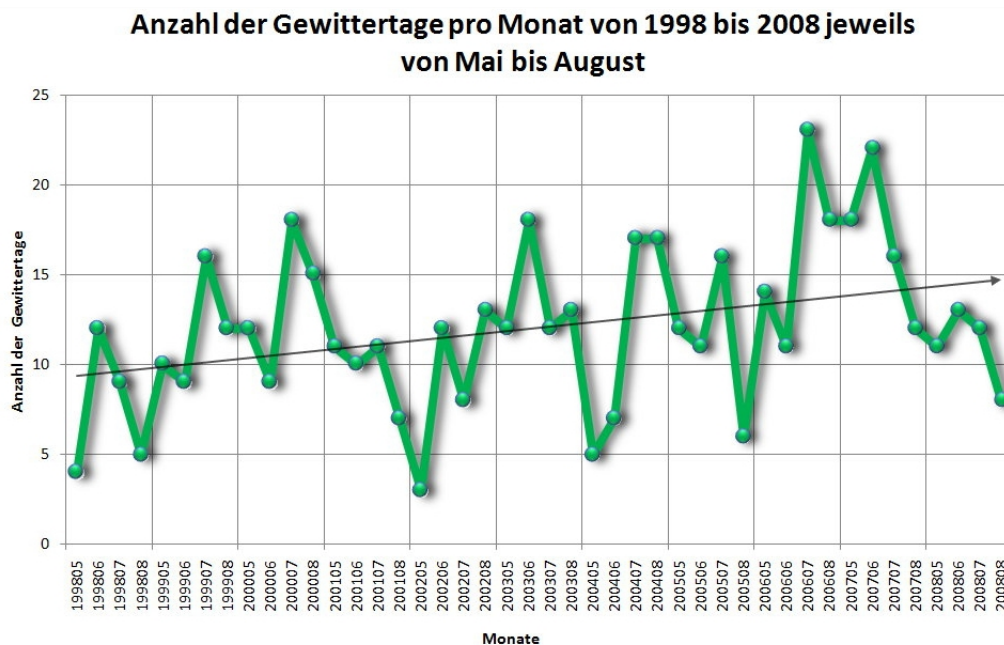


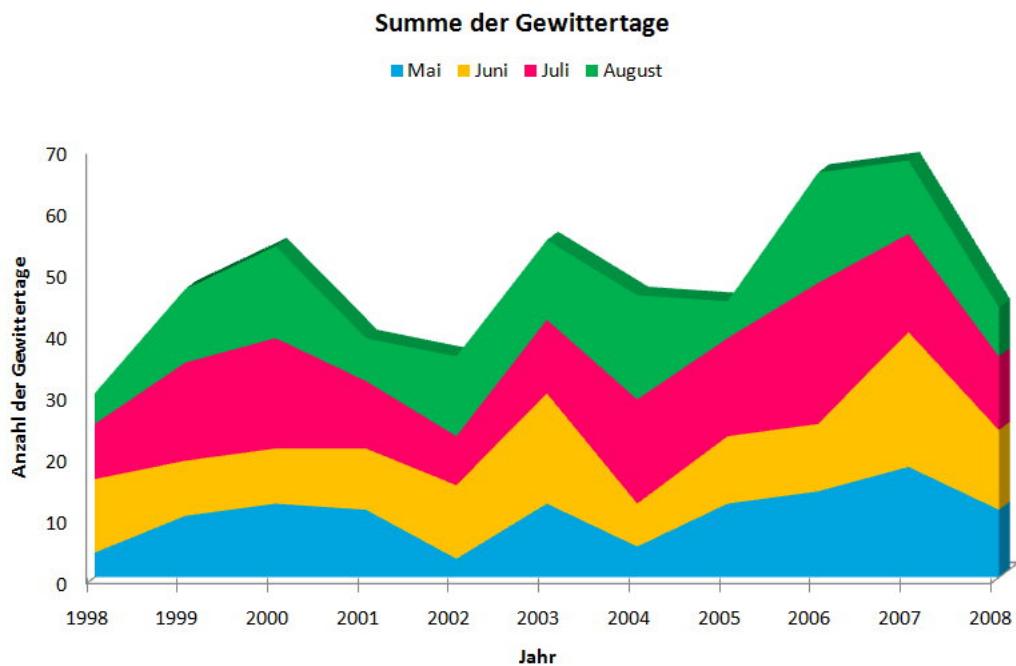


Abbildung 11: Häufigkeitsverteilung aller Gewittertage über die Monate hinweg. Mit eingezeichneter Trendlinie (schwarzer Pfeil). Auf der Abszisse befinden sich die Monate Mai, Juni, Juli und August chronologisch für die Jahre von 1998 bis 2008. Auf der Ordinate die Anzahl der Gewittertage.

In Abbildung 12 werden die zu untersuchenden Monate von 1998 bis 2008 getrennt miteinander verglichen. Abbildung 12 (a) zeigt eine erstellte Pivot Tabelle zur besseren Übersicht mit den Summen der Gewittertage für die einzelnen Jahre und Monate. In Abbildung 12 (b) wird diese Pivot Tabelle grafisch dargestellt. Am Gesamtergebnis erkennt man, dass die meisten Gewittertage im Juli und Juni existieren. Im Mai und August fallen die Anzahlen an Gewitter hingegen schon wieder. Somit ist die Hochsaison von Gewitter im COPS Gebiet in den Juli einzuordnen. Des Weiteren erkennt man, dass in den Jahren 2001, 2002 sowie in 2004 und 2005 verhältnismäßig weniger Gewittertage existieren als in den restlichen Jahren. Das Jahr der Messkampagne 2007 weist deutlich viele Gewittertage im Vergleich zu den anderen Jahren auf, mit besonders viel Gewitteraktivität im Mai und Juni. In diesem Jahr standen allerdings auch mehr Blitzsensoren zur Verfügung als in den anderen Jahren, da extra für die COPS Messkampagne zusätzlich Sensoren aufgestellt wurden.

(a)

Summe der Gewittertage	Monat 				
Jahr 	Mai	Juni	Juli	August	Gesamtergebnis
1998	4	12	9	5	30
1999	10	9	16	12	47
2000	12	9	18	15	54
2001	11	10	11	7	39
2002	3	12	8	13	36
2003	12	18	12	13	55
2004	5	7	17	17	46
2005	12	11	16	6	45
2006	14	11	23	18	66
2007	18	22	16	12	68
2008	11	13	12	8	44
Gesamtergebnis	112	134	158	126	530



(b)

Abbildung 12: (a):Pivot Tabelle, mit Häufigkeitsverteilung der einzelnen Gewittertage für jeden Untersuchungsmonat für jedes Jahr von 1998 bis 2008. (b): Die grafische Darstellung zur Pivot Tabelle aus (a). Auf der Abszisse befinden sich die einzelnen Jahre, auf der Ordinate die Anzahl der Gewittertage. Die Verlaufslinie in blau steht für den Mai, gelb für den Juni, pink für Juli und grün für den August.

## 4.2 Gewittersysteme

In Abschnitt (2.3) werden Gewitter in verschiedene Systeme eingeteilt: in Luftmassengewitter (mit Wärmegewittern und orographischen Gewittern), in Frontengewitter (wenn eine Front involviert ist) und mesoskalige konvektive Systeme wie zum Beispiel Multizellen, Superzellen und Squall lines.

Im folgenden Abschnitt wird auf diese Einteilung Rücksicht genommen, indem prozentuale Verteilungen für die jeweiligen Gewittersysteme für das COPS Gebiet für den Untersuchungszeitraum grafisch dargestellt werden (siehe Abbildung 13).

Ermittelt wurden die Gewittersysteme mit Hilfe der Radar Animationen und Blitzdaten, um Einzelzellengewitter von größeren mesoskaligen Systemen zu trennen. Da Einzelzellen nach der Definition her recht kurzlebig sind, etwa eine halbe Stunde bis Stunde und isoliert auftreten, können sie ganz gut von größeren Gewitterzellen, die mehrere Stunden lang existieren und eventuell auch mit anderen Zellen verknüpft sind unterschieden werden. Frontengewitter wurden über die Bodenanalysekarten bestimmt. Falls eine Front in der Nähe des Untersuchungsgebiets vorlag, wurde zusätzlich mittels Radarbildern überprüft, ob die Front durch das Gebiet hindurchzog. Falls dies der Fall war, wurde der Tag als Frontengewittertag eingestuft. Natürlich können an einem Tag mehrere Gewittersysteme gleichzeitig auftreten, in diesem Fall wurde dem vorherrschendem Gewittersystem Vortritt gelassen.

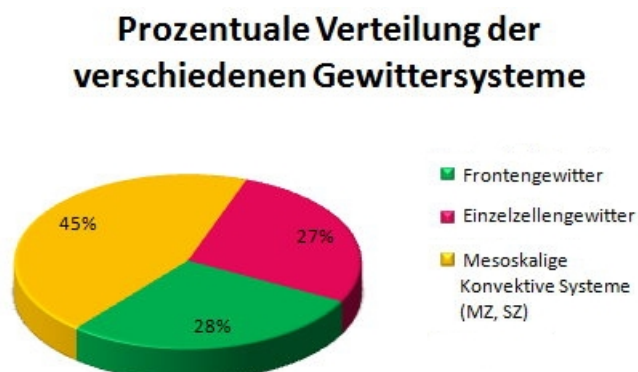


Abbildung 13: Prozentuale Verteilung der verschiedenen Gewittersysteme. Einteilung in Einzelzellengewitter, mesoskalige konvektive Systeme (wie zum Beispiel Multizellengewitter, Superzellengewitter und Squall Lines) und Frontengewittertage.

Von den insgesamt 530 Gewittertagen handelt es sich zu 27 % (144 Tage) um Einzelzellengewitter. Bei 28 % (150 Tage) handelt es sich um Gewitter an Fronten mit 45 % (236 Tage) aller Gewittertage sind mesoskalige konvektive Systeme wie Multizellen, Superzellen und andere mesoskalige Systeme beteiligt.

Eine prozentuale Verteilung der verschiedenen Gewittersystemen für die einzelnen Jahre befindet sich in Abbildung 14. Frontengewittertage waren zum Beispiel im Jahr 2000 eher selten, dagegen überwogen die Tage mit Einzelzellengewitter. Im Jahr 2007 gab es viele Tage mit Frontengewitter und weniger mesoskalige konvektive Gewittersysteme.

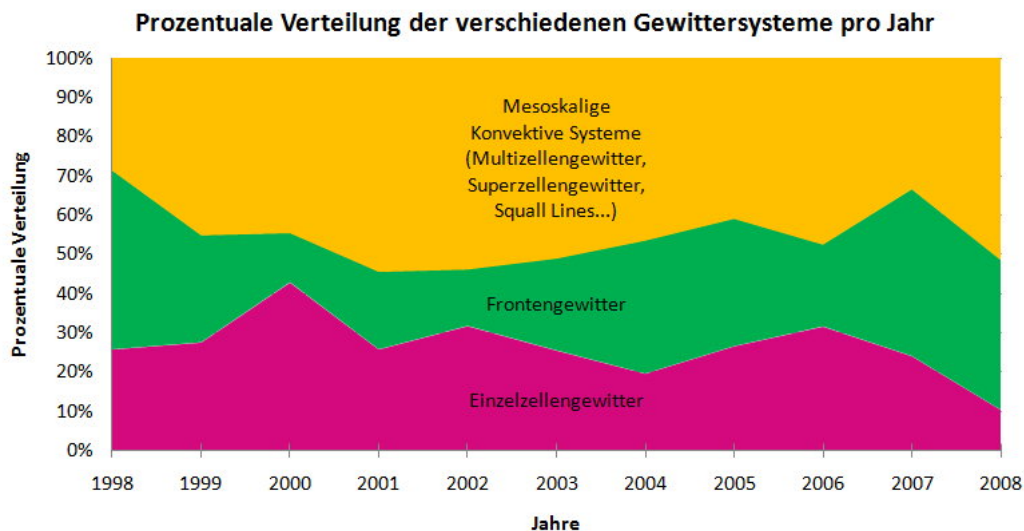


Abbildung 14: Prozentuale Verteilung (Ordinate) der verschiedenen Gewittersysteme über die einzelnen Jahre (Abszisse) hinweg. Dargestellt werden drei verschiedene Gewittersysteme, darunter Einzelzellengewitter, Frontengewitter und mesoskalige konvektive Systeme wie Multizellengewitter, Superzellengewitter und andere mesoskalige Systeme.

Das Hauptinteresse der zu untersuchenden Gewitter liegt bei Luftmassengewitter. Zu Luftmassengewitter gehören Wärmegewitter und oft orographische Gewitter. In der Einteilung zuvor wurden neben Frontengewitter und mesoskalige Konvektive Systeme nur Einzelzellengewitter betrachtet, welcher nur ein Teilbereich der Luftmassengewitter darstellt. Wärmegewitter beziehungsweise orographische Gewitter und somit Luftmassengewitter bestehen häufig aus Einzelzellengewitter. Jedoch ist es nicht selten, dass aus einem Wärmegewitter ein Multizellen- oder Superzellengewitter entsteht, was eigentlich in die Abteilung der mesoskaligen Konvektiven Systeme zugeordnet werden müsste.

Daher wird im folgenden eine neue Einteilung vorgenommen. Es werden Luftmassengewitter betrachtet, die durch Wärmegewitter oder orographische Gewitter entstanden sind und als Einzelzellen-, Multizellen-, oder Superzellengewitter vorliegen.

### 4.3 Luftmassengewitter

Die Einteilung in Luftmassengewitter, Frontensysteme und mesoskalige konvektive Systeme ist wie oben schon erwähnt nicht immer eindeutig trennbar. Oft handelt es sich bei Frontengewitter um mesoskalige konvektive Systeme. Es schließt auch nicht aus, dass ein Luftmassengewitter Multizellen produziert, wenn vertikale Windscherung vorhanden ist. Allein von der Größe her würde man sie zu mesoskaligen konvektiven Gewitter zählen, ihre Entstehungsursache schließt aber ein Luftmassengewitter nicht aus. Im folgenden werden Luftmassengewitter und Frontengewitter getrennt betrachtet. Dabei können sowohl bei Luftmassengewitter Einzelzellen, Multizellen und Superzellen auftreten wie auch bei Frontengewitter zum Beispiel Squall Lines auftreten können.

Die Einteilung der Luftmassengewitter im Hinblick auf Einzelzellen-, Multizellengewitter wird wie folgt vorgenommen. Da Einzelzellengewitter, Multizellengewitter und Superzellengewitter innerhalb eines Tages gleichzeitig auftreten können wird wie schon weiter vorher vorgenommen der vorherrschenden Luftmassengewitter den Vorzug gegeben.



Die Abgrenzung von Superzellengewitter zu Multizellengewitter mittels der Radarbilder beziehungsweise Blitzbilder war nicht möglich. Aufgrund der langen Lebensdauer sowohl bei Multizellen als auch bei Superzellen, lassen sie sich nur schwer unterscheiden. Oft teilen sich zwar Superzellengewitter in zwei Gewitter auf (splitting cells), was für eine mögliche Identifizierung von Superzellengewitter weiter helfen könnte. Die Zellteilung tritt allerdings nicht zwingendermaßen bei jeder Superzelle auf. Aus diesen Gründen wird für die Definition von Superzellengewitter auf den Parameter “Bulk Richardson Number” (siehe Abschnitt 2.3.3) zurückgegriffen. Der Parameter wird zu allen Luftmassengewittertagen berechnet. Falls der Wert innerhalb der Definition einer Superzelle liegt wird der Tag als Superzellentag eingestuft. So viel Wert sollte auf die Superzellengewittertage aber nicht gelegt werden, da diese Definition nur von einem Parameter abhängt. Liegt der BRN Wert zwischen 15 und 45, ist dies nur eine Aussage das Superzellengewitter diese Umgebungsbedingungen bevorzugen. Aber es muss nicht zwingendermaßen eine Superzelle entstehen.

Analysiert werden die Luftmassengewittertage mit Hilfe von animierten Radarbildern, die alle 15 Minuten erzeugt wurden. Dadurch ist eine gute Entwicklung auf den Bildern zu erkennen. Auf den Blitzbildern ist ebenfalls eine Einteilung möglich anhand der zeitlichen und räumlichen Blitzaktivitätsverteilung. So zählen isolierte Gewitter, die nur kurz eine hohe Reflektivitätsstufe aufweisen zu Einzelzellengewittertage. Gewitter die längere Zeit hohe Reflektivität besitzen und möglicherweise auch wandern, zählen zu Multizellengewittertage.

**Häufigkeit von Zelltypen der 293  
Luftmassengewitter**

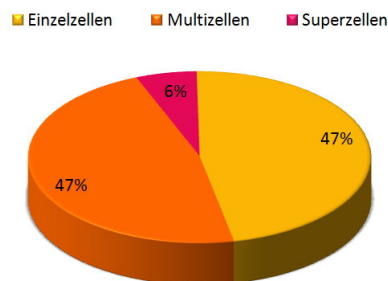


Abbildung 15: Häufigkeitsverteilung der Luftmassengewittertage von Einzelzellen-, Multizellen- und Superzellengewittertage.

Insgesamt handelt es sich um 293 Luftmassengewittertage. Superzellen treten in Deutschland relativ selten auf, daher ist die geringe Prozentanzahl von 6% (17 Tage) auch nachvollziehbar. Einzelzellen und Multizellen halten sich die Waage mit 47% (138 Gewittertage).

#### 4.3.1 Windrichtung

Die Winde in den Höhenniveaus von 850 hPa und 500 hPa wurden aus den Radiosondestationen von Stuttgart und Nancy ermittelt.

Die vorliegenden Windrichtungen wurden in acht Hauptwindrichtungen eingeteilt, namentlich Norden, Nordosten, Osten, Südosten, Süden, Südwesten, Westen, und Nord-

westen. Die jeweiligen Reichweiten der einzelnen Windrichtungen werden in Tabelle 6 dargestellt.

N	337,5-022,5	S	157,5-202,5
NO	022,5-067,5	SW	202,5-247,5
O	067,5-112,5	W	247,5-292,5
SO	112,5-157,5	NW	292,5-337,5

Tabelle 6: Zeigt die Einteilung der acht Hauptwindrichtungen, mit den zugeordneten Gradzahlen der Windrichtung, die aus den Radiosondenaufstiegen ermittelt wurden.

Der Wind der bei Bildung von Luftmassengewitter am häufigsten vorherrscht kommt im 850 hPa Höhenniveau aus Süden, Südwesten bis Westen (siehe Abbildung 16). Die Windrichtungen aus Osten und Norden sind zwar auch vertreten, aber dennoch eher selten. Ein Minimum mit unter 20 Gewittertagen befindet sich bei einer Nordströmung. Ein kleiner Unterschied zwischen Nancy und Stuttgart existiert noch im 850 hPa Höhenniveau. In einer Höhe von 500 hPa besteht eine noch bessere Übereinstimmung der Windrichtung in Nancy und Stuttgart (siehe Abbildung 17). Die Hauptwindrichtung in diesem Niveau verschiebt sich noch mehr in Richtung Westen. An fast 80 Luftmassengewittertagen tritt die Windströmung in 500 hPa Höhenniveau aus Westen auf. Vergleichsweise treten nur an 10 Luftmassengewittertagen eine Ostströmung auf.

#### Häufigkeitsverteilung der Windrichtung bei Luftmassengewittern in 850 hPa

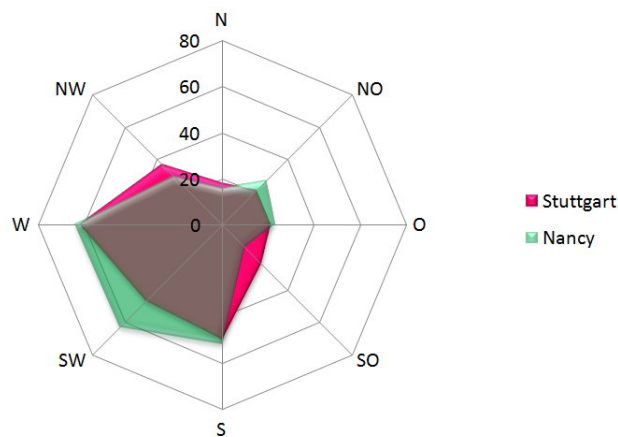


Abbildung 16: Häufigkeitsverteilung der Windrichtungen für das Höhenniveau in 850 hPa aus Luftmassengewittertagen. Pink steht für den Ort Stuttgart, grün für Nancy. Auf den Achsen sind die Windrichtungen (N, NO, O, SO, S, SW, W, NW) angegeben sowie die Anzahl der Luftmassengewittertage mit entsprechender Windrichtung.

### Häufigkeitsverteilung der Windrichtung bei Luftmassengewitter in 500 hPa

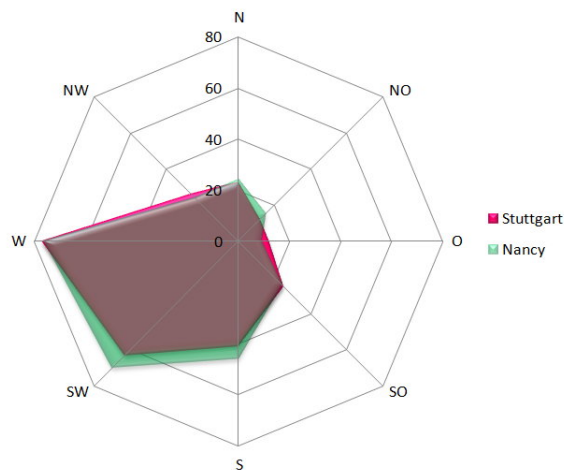


Abbildung 17: Häufigkeitsverteilung der Windrichtungen für das Höhenniveau in 500 hPa bei Luftmassengewittertage. Pink steht für die Windrichtung in Stuttgart, grün für Nancy. Auf den Achsen sind die Windrichtungen (N, NO, SO, S, SW, W, NW) angegeben sowie die Anzahl der Luftmassengewittertage mit entsprechender Windrichtung.

#### 4.3.2 Zugrichtung

Die Betrachtung der Zugbahnen von Luftmassengewittern, wurde in Abhängigkeit der Windrichtungen vollzogen. Die Gewitterzugrichtungen wurden über die Radaranimationen von allen Luftmassengewitter bei denen eine Verlagerung beobachtet wurde objektiv ermittelt. Die Zugrichtungen wurden sowohl für die Station Stuttgart als auch für die Station Nancy vorgenommen.

Als Ergebnis lässt sich beobachten, dass die Zugrichtungen der Luftmassengewittern entgegengesetzt der Windrichtung verlaufen, zumindest für die Höhe von 500 hPa aber auch in 850 hPa sind die Zugrichtungen der Windrichtungen in den meisten Fällen entgegengesetzt. Das bedeutet, bei einer Hauptwindströmung aus Südwesten ist mit einer Verlagerung der Gewitter nach Nordosten zu rechnen (siehe Abbildung 18). Vereinzelt ergeben sich Zugrichtungen nach Osten, vor allem im Höhenniveau von 850 hPa, aber eine deutliche Hauptzugrichtung ist nach Nordosten zu erkennen, sowohl für das Höhenniveau in 500 hPa als auch in 850 hPa.

Bei einer anderen vorliegenden Windrichtung ergibt sich eine auffallendere Abweichung der Beobachtung. Im Falle einer Südostströmung, treten deutlichere Abweichungen der gewöhnlichen Zugrichtungen zwischen den zwei Höhenniveaus auf (Siehe Abbildungen 19). Während im Höhenniveau von 500 hPa bei einer Südostströmung eine Hauptzugrichtung nach Nordwesten zu beobachten ist, tritt im Höhenniveau von 850 hPa, eine deutliche Abweichung dieser Zugrichtung auf. Hier teilen sich die Zugrichtungen in zwei Hauptäste, mit Zugrichtungen nach Nordwesten und Nordosten.

Die Abweichungen der Zugrichtungen zwischen den beiden Höhenniveaus, werden möglicherweise durch lokale Einflüsse der Gebirge in niedrigeren Höhen verursacht. Aufgrund der Ausrichtung der Gebirge von Südwest nach Nordost, sowohl beim Schwarzwald als auch

bei den Vogesen, kann dies im Rheintal leicht zu einer Kanalisierung führen mit resultierender Südwestströmung, auch wenn der Wind ursprünglich aus einer anderen Richtung kommt.

Oft variiert die Anzahl der Gewittertage zwischen Nancy und Stuttgart, was auf fehlende Daten in den Radiosondenaufstiegen zurückzuführen ist.

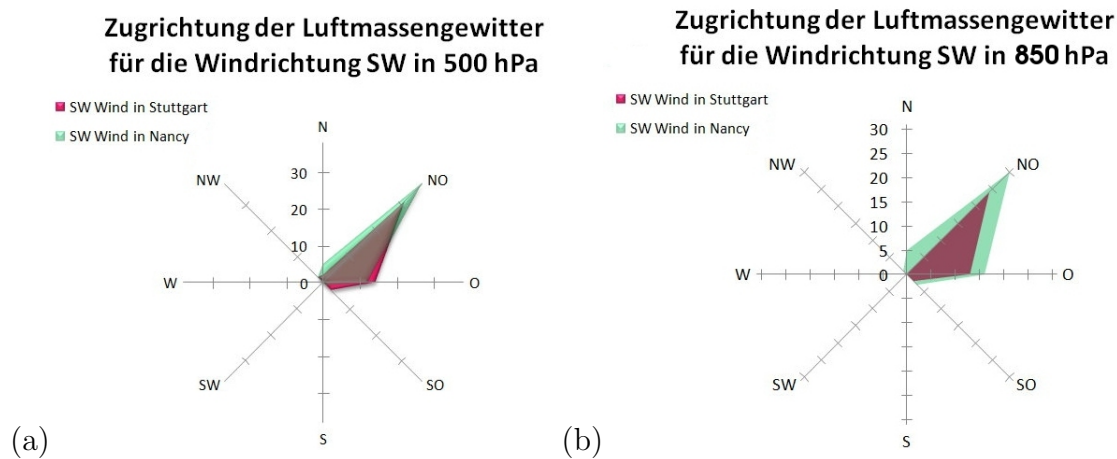


Abbildung 18: (a): Häufigkeitsverteilung der Zugrichtung von Luftmassengewitter bei einem Südwind in 500 hPa Höhengniveau. (b): Häufigkeitsverteilung der Zugrichtung von Luftmassengewitter bei einem Südwind in 850 hPa Höhengniveau. Jeweils für die Stationen Stuttgart (pink) und Nancy (grün).

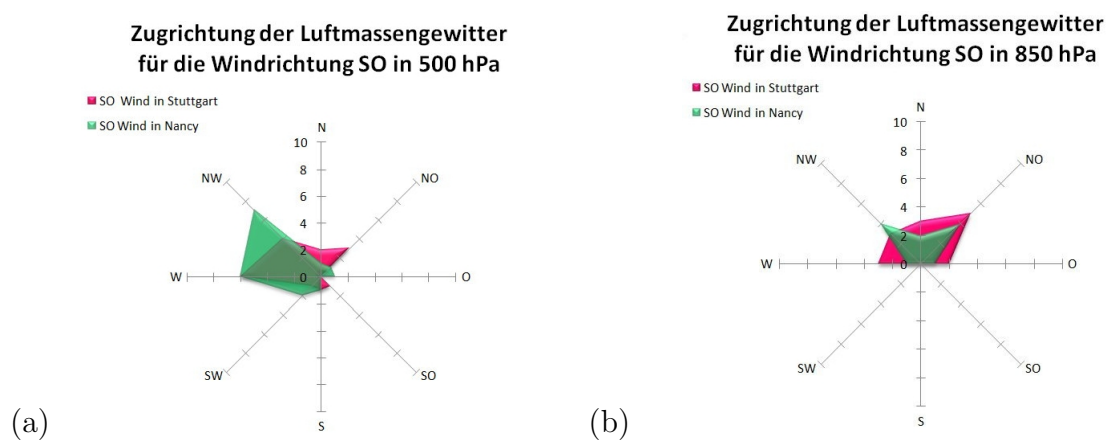


Abbildung 19: (a): Häufigkeitsverteilung der Zugrichtung von Luftmassengewitter bei einem Südostwind in 500 hPa Höhengniveau. (b): Häufigkeitsverteilung der Zugrichtung von Luftmassengewitter bei einem Südostwind in 850 hPa Höhengniveau.

In der Auswertung der Zugbahngewitter, werden Gewittertage an denen die Gewitter ortsfest waren nicht mitberücksichtigt. Eine auffällige Anhäufung von lokalen Gewittertage bei einer bestimmten Windrichtung war nicht eindeutig erkennbar. Bei einer Nordströmung sind elf lokale Gewittertage aufgetreten, etwas mehr als bei einer Ostströmung mit vier lokalen Gewittertagen. Bei einer Westströmung die mit der Südwestströmung die häufigsten Windrichtungen somit Gewittertage vertreten, sind etwa zwölf Gewittertage lokal aufgetreten. Bei einer Südströmung waren es hingegen fast 20 lokale Gewittertage. Es sei angemerkt das die Varianz der lokalen Gewittertage zwischen den Orten Stuttgart

und Nancy sowie zwischen den Höhenniveaus von 850 hPa und 500 hPa sehr hoch war, sodass die Werte nur einen Mittelwert bilden.

### 4.3.3 Vergleich verschiedener Gewitterparameter

In den Abbildungen 20 bis 22 werden verschiedene Parameter aus Radiosondenaufstiege miteinander verglichen. Es stehen zwei Orte: Stuttgart und Nancy mit Radiosondenaufstiegsmessungen innerhalb des COPS Gebiets zur Verfügung. Die verschiedenen Parameter CAPE, CIN, Lifted Index, Total Totals und Spread beziehen sich jeweils auf Einzelzellengewitter (siehe Abbildung 20), auf Multizellengewitter (Abbildung 21) und Superzellengewitter (Abbildung 22).



Abbildung 20: Ausgewählte gewitterrelevante Parameter (CAPE, CIN, Lifted Index, Total Totals und Spread) aller Einzelzellengewittertage ermittelt aus Radiosondenaufstiegen in Stuttgart (pink) und Nancy (grün).





Abbildung 21: Ausgewählte gewitterrelevante Parameter (CAPE, CIN, Lifted Index, Total Totals und Spread) aller Multizellengewittertage ermittelt aus Radiosondenaufstiegen in Stuttgart (pink) und Nancy (grün).

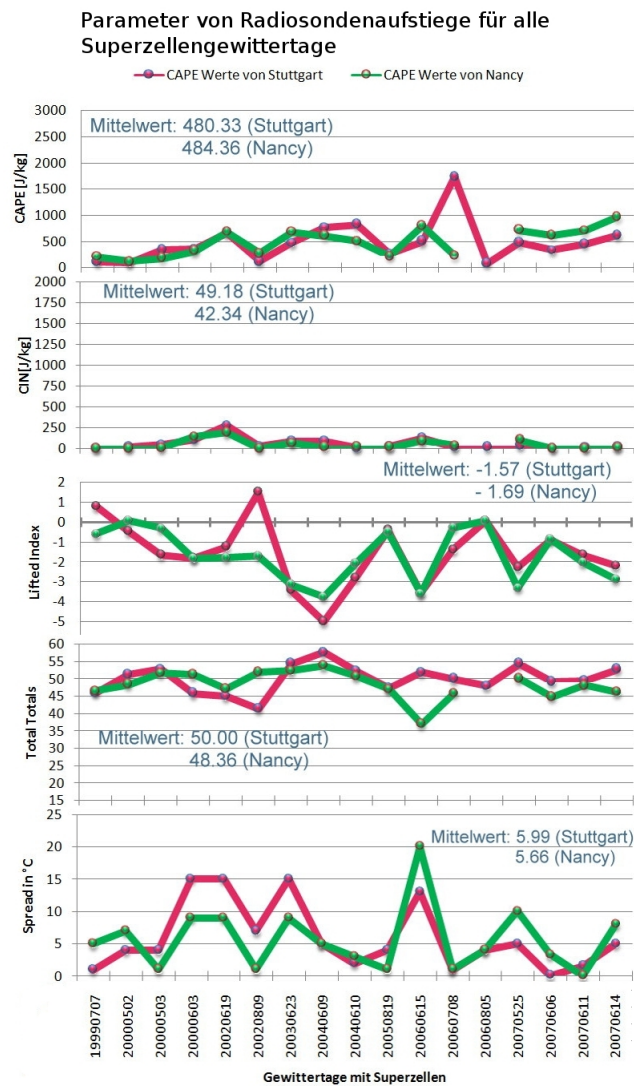


Abbildung 22: Ausgewählte gewitterrelevante Parameter (CAPE, CIN, Lifted Index, Total Totals und Spread) aller Superzellengewittertage ermittelt aus Radiosondenaufstiegen in Stuttgart (pink) und Nancy (grün).

Zur besseren Übersicht werden die Mittelwerte der Parameter der unterschiedlichen Luftmassengewitter nochmal in der Tabelle 7 aufgeführt.

Eine Zunahme der CAPE Werte von Einzelzellengewitter über Multizellengewitter bis zu Superzellengewitter ist ersichtlich. Dennoch fallen die Werte vergleichsmäßig der üblichen CAPE Werte (siehe Tabelle 1) gering aus. Die CAPE Werte der zwei Stationen Stuttgart und Nancy, repräsentieren daher die Orte an denen sich tatsächlich Gewitter gebildet haben sehr schlecht.

Ursachen dafür können durch unterschiedliche Entstehungszeiten der Gewitter passieren. Die Hauptzeit in der sich Gewitter befinden, liegt bei 15 Uhr UTC (siehe Abbildung 32). Die Radiosondenaufstiege sind nur für 12 Uhr UTC verfügbar. Dazwischen kann sich die Schichtung der Atmosphäre noch ändern, sodass der CAPE Wert der Station um 12 Uhr nicht dem CAPE Wert um 15 Uhr entspricht.

Des Weiteren sind die Gewitter nicht unbedingt über die Stationen gewzogen oder dort entstanden und befinden sich daher nicht unbedingt in einem Vergleichsort der Gewit-

ter. Zum Beispiel entstehen sehr häufig Gewitter über den Gebirgen beziehungsweise auf der Leeseite nach [Hagen, M., et al., 2009]. Die verfügbaren Stationen liegen aber eher in Ebenen außerhalb der Entstehungsquellen von Gewitter.

Außerdem sind generell Schwankungen von CAPE Werten von über mehrere 100 J/kg in dem COPS Gebiet möglich. Siehe Fallbeispiel 15. Juli 2007 [Kalthoff, N., et al., 2008], in denen unterschiedliche CAPE Werte für verschiedene Orte vorlagen, wie zum Beispiel 483 J/kg in Burnhaupt le Bas und Achern mit nur 90 J/kg. Dieser Effekt kann durchaus durch lokale Einflüsse der Strömungen hervorgerufen werden und somit auch Auswirkungen auf die Schichtung haben.

Vergleichsweise schlecht repräsentative CAPE Werte wurden bei [Bartenschlager, B., 1997] ebenfalls schon gefunden, durch Fehlen der zeitlichen und räumlichen Nähe eines Gewitters.

Aus den Abbildungen ist neben der leichten Zunahme der CAPE Werte von Einzelzellengewitter über Multizellengewitter zu Superzellengewitter ebenso eine Zunahme des negativen Lifted Index (LI) beobachtbar. Eine leichte Zunahme des Total Totals ist auch annehmbar. Welche alle insgesamt zu einer Steigerung der Labilität führen. Die CIN Werte halten mehr oder weniger einen konstanten Wert und weisen keine erkennbare Abnahme oder Zunahme im Hinblick auf unterschiedliche Gewitterzelltypen auf. Der Spread Index scheint sich zu verringern. Das bedeutet bei der Bildung von Multizellen und Superzellen ist demnach mehr Feuchte vorhanden als bei Einzelzellengewitter. Bei dem Vergleich der Parameterwerte innerhalb einer Luftmassengewitterart, treten von Gewittertag zu Gewittertag hohe Schwankungen auf, sodass nicht wirklich ein kontinuierlicher Wert festzustellen ist.

	CAPE		CIN		LI		TT		Spread	
EZ	333.49	278.19	44.50	51.30	0.63	0.08	47.69	47.01	6.69	6.62
MZ	303.87	450.94	52.42	40.72	-0.36	-1.25	48.12	47.74	6.20	5.92
SZ	480.33	484.36	49.18	42.34	-1.57	-1.69	50.00	48.36	5.99	5.66

Tabelle 7: Zeigt zusammenfassend die Mittelwerte der verschiedenen Parameter aus den Abbildungen 20, 21 und 22 für Einzelzellengewitter(EZ), Multizellengewitter(MZ) und Superzellengewitter(SZ) für die zwei Stationen, Stuttgart (linker Wert) und Nancy (rechter Wert).



#### 4.3.4 Entstehungsorte

Bei den Entstehungsorten und Entstehungszeiten handelt es sich nicht mehr um Gewittertage sondern um die tatsächliche Anzahl von Gewittern die über Radardaten und auch Blitzdaten für örtliche und zeitliche Verteilung von Gewittern ermittelt wurde.

Auch wenn hier die Rede von Entstehungsorten, später auch von Entstehungszeiten von Gewittern ist, wird vielmehr nur die Auftretungsorte beziehungsweise die Auftretungszeiten von Gewittern angezeigt.

Wie schon in Abschnitt 1.3 erwähnt, kam während der COPS Messkampagne die Vermutung auf, dass sich Gewitterzellen in Abhängigkeit von der Windrichtung an bestimmten Gebieten bevorzugt bilden [Hagen, M., et al., 2009]. In den folgenden Abbildungen (24 bis 31) werden die maximalen Reflektivitäten der RADAR Bilder genutzt um die Entstehungsorte von Luftmassengewitter ausfindig zu machen. Nach Schiesser et al., 1995 wird davon ausgegangen, dass Reflektivitätswerte ab 47 dBZ eine Gewitterzelle repräsentieren. Aus diesem Grund werden alle Reflektivitätswerte die größer gleich Stufe 5 (ab 46 dBZ) sind auf eine Karte geplottet. Der Ort ab dem Zeitpunkt wo Konvektion einsetzt wird allerdings nicht ersichtlich. Lediglich der Ort zu dem Zeitpunkt ab dem eine Konvektion sich zur Gewitterzelle entwickelt hat wird abgebildet. Um auch den Entstehungsort der Konvektion mit zu berücksichtigen, hätte man noch einen Schwellwert mit geringerer Reflektivität als Stufe 5 wählen müssen, wobei dann nicht sicher wäre, ob sich aus der Konvektion überhaupt eine Gewitterzelle entwickelt hätte. Daher wurde der Schwellwert bei Stufe 5 gesetzt.

Die unterschiedlichen Farben in den folgenden Abbildungen entsprechen der Anzahl der pro Radarpixel mit der Stufe 5 und 6 liegenden Radarmessungen. Zum Beispiel bedeutet die Anzahl von 50, dass an 50 mal 15 Minuten (62,5 Stunden) an diesem Pixel während der insgesamt 293 Luftmassengewittertage (7032 Stunden) die Reflektivitätsstufe 5 oder 6 (über 46 dBZ) erreicht wurde. Man beachte, dass die Anzahl der Anhäufungen in den Farbbalken von Abbildung zu Abbildung variieren können.

Bei der Betrachtung der Entstehungsorte von allen Luftmassengewitter unabhängig von der Windrichtung (siehe Abbildung 23) , erkennt man dass im Schwarzwald nördlich wie südlich, im Westen der Gebirge größere Anhäufungen von Gewittern vorzufinden sind, des Weiteren über der Schwäbischen Alb zentral über dem Gebirge und vermehrt im Osten und Westen sowie zentral über den Südvogesen. Über den Nordvogesen befinden sich die Gewitter vermehrt im Nordwesten. Im Oberrheintal liegt in der Gegend um Straßburg herum eine weitere auffallende Anhäufung von Gewittern. Das Gebiet um Stuttgart weist ebenfalls relativ viele Anzahlen auf. Bei der Betrachtung der topografischen Karte (siehe Abbildung 1) befindet sich das Gebiet zwar nicht in so großen Höhen wie die Gebirge selbst, im Vergleich zur Rheinebene aber dennoch deutlich höher. In der Pfalz weiter nördlich, schon außerhalb des Beobachtungsgebietes befinden sich ebenfalls vermehrte Anzahlen von hohen Reflektivitätswerten die auf Gewitter schließen lassen.

Auffallend wenig Gewitter entstehen hingegen im Westen und südlichem Raum des Beobachtungsgebietes. Auch im südlichen Oberrheintal befinden sich weniger Ansammlungen von Gewittern, wie weiter nördlich der Tiefebene.

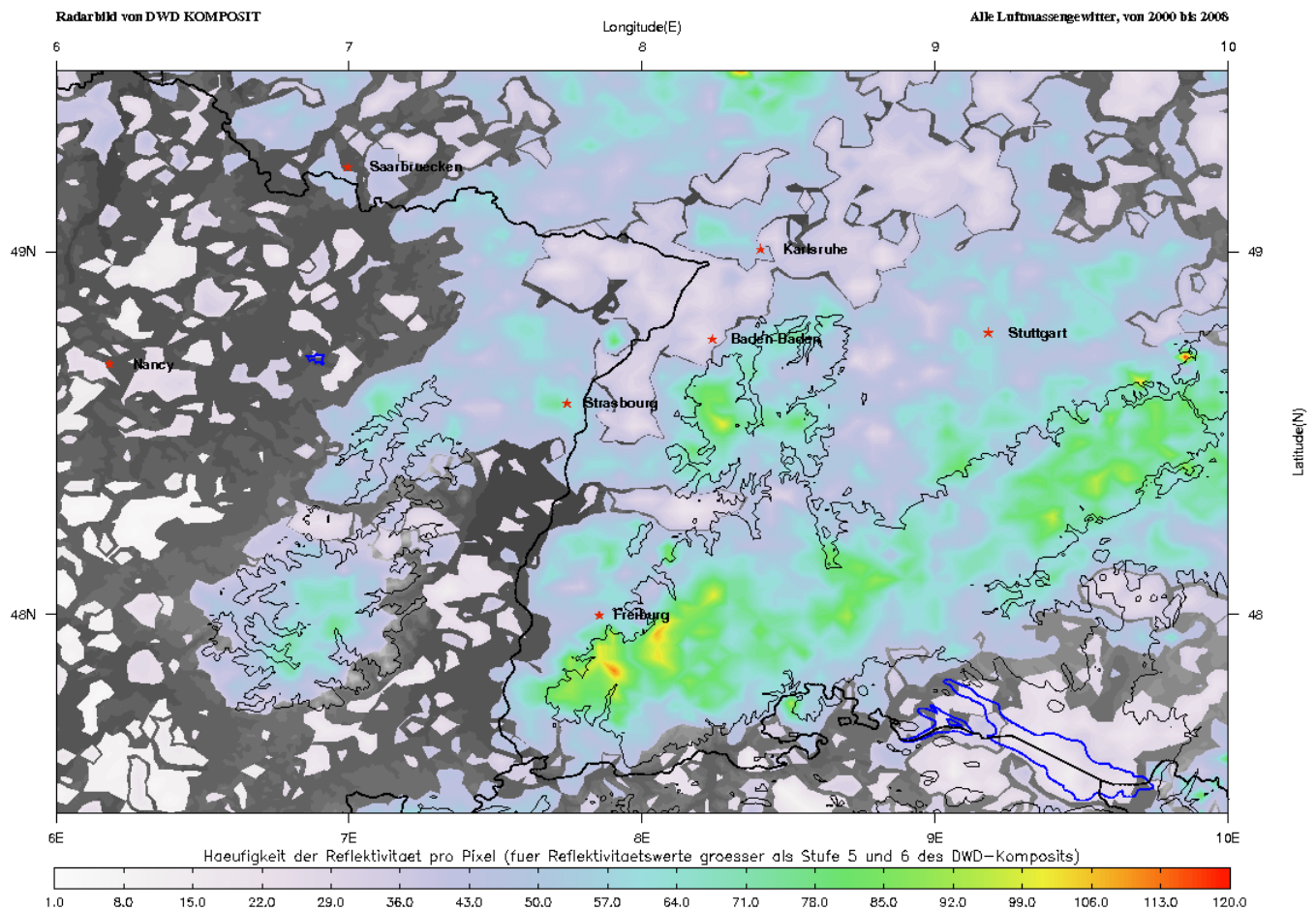


Abbildung 23: Häufigkeitsverteilung der Entstehungsorte von allen Luftmassengewitter von 2000 bis 2008. Der farbige Balken unten im Bild, zeigt die Anzahl der pro Radarpixel mit der Stufe 5 und 6 liegenden Radarmessungen. Es werden nur Reflektivitätswerte die größer gleich der Schwellwert von 46 dBZ sind angegeben.

Auffallend sind die unterschiedlichen Häufigkeiten von Gewitterzellen und ihre Entstehungsorte je nach Windrichtungen. Da die Übereinstimmung der Windrichtungen von Stuttgart und Nancy in dem Höhengniveau von 500 hPa am ehesten zutrifft, wurde für die Abhängigkeit der Windrichtung bei Entstehungsorte von Luftmassengewittern auf die Windrichtung in 500 hPa zurückgegriffen.

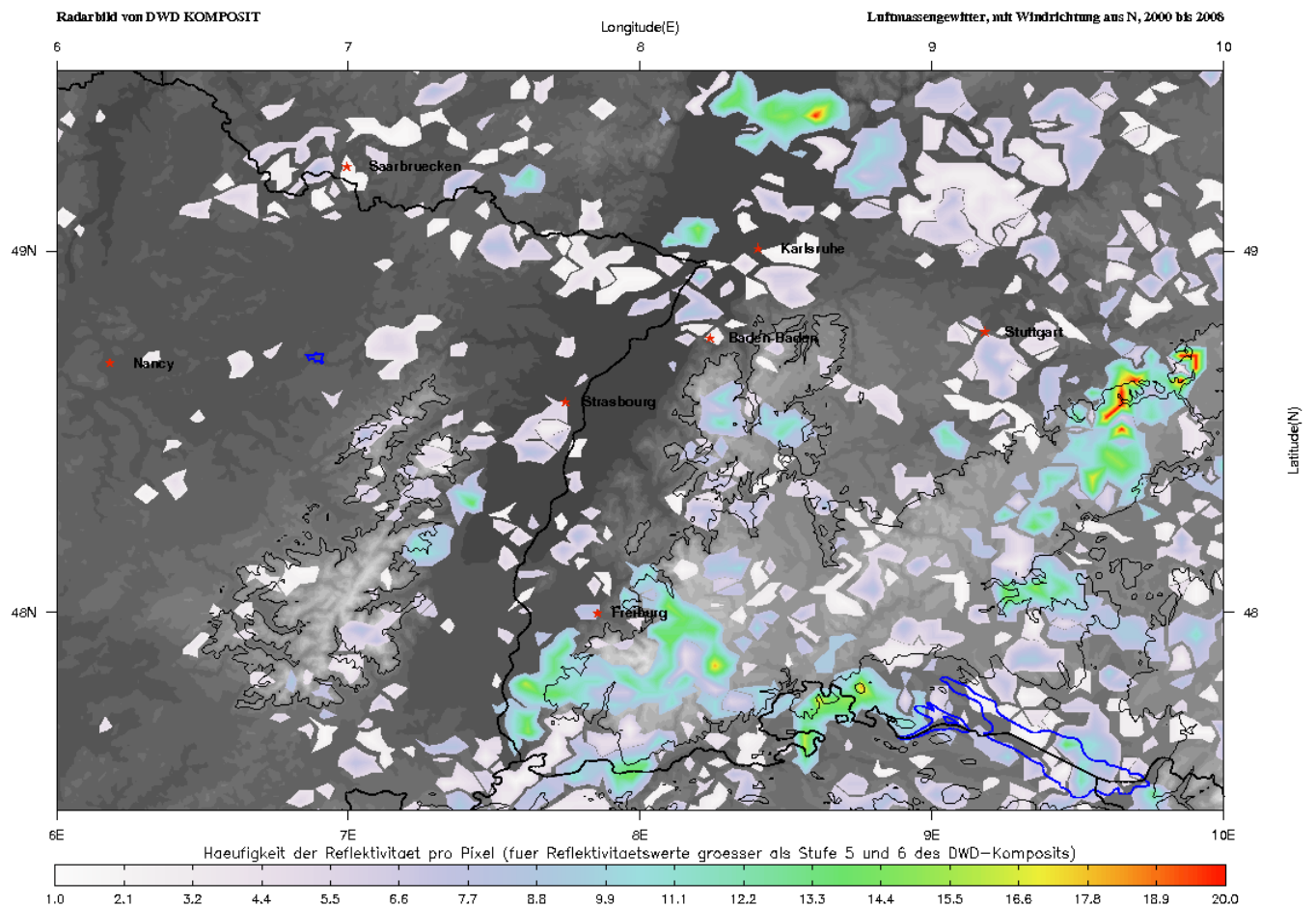


Abbildung 24: Häufigkeitsverteilung der Entstehungsorte von allen Luftmassengewitter von 2000 bis 2008 mit Windströmung aus Norden im 500 hPa Höhenniveau. Der farbige Balken unten im Bild zeigt die Häufigkeit der Reflektivität pro Pixel an. Es werden nur Reflektivitätswerte größer als Stufe 5 (entspricht 46 bis 55 dBZ) und 6 (entspricht > 55 dBZ) geplottet.

Die Entstehungsorte von Luftmassengewitter bei einer Windrichtung aus Norden (siehe Abbildung 24) zeigen in erster Linie Anhäufungen im Osten der Schwäbischen Alb, im Südschwarzwald und Nordschwarzwald, westlich des Bodensees, im Nordosten der Vogesen, sowie im Norden des Oberrheintals. Schwächere Anhäufungen sind in Stuttgart und nördlicher Umgebung, sowie gut verteilt im Südosten des COPS Gebiets zu beobachten. Es scheint eine Art Linie von Gewitterbildungen entlang der Staatsgrenze von Saarbrücken aus Richtung Osten bis Karlsruhe zu geben. Generell sind östlich des Oberrheintals mit mehr Gewitteraktivität zu rechnen, vor allem über Gebirge. Zwischen Karlsruhe und Stuttgart sind kaum Gewitter entstanden.

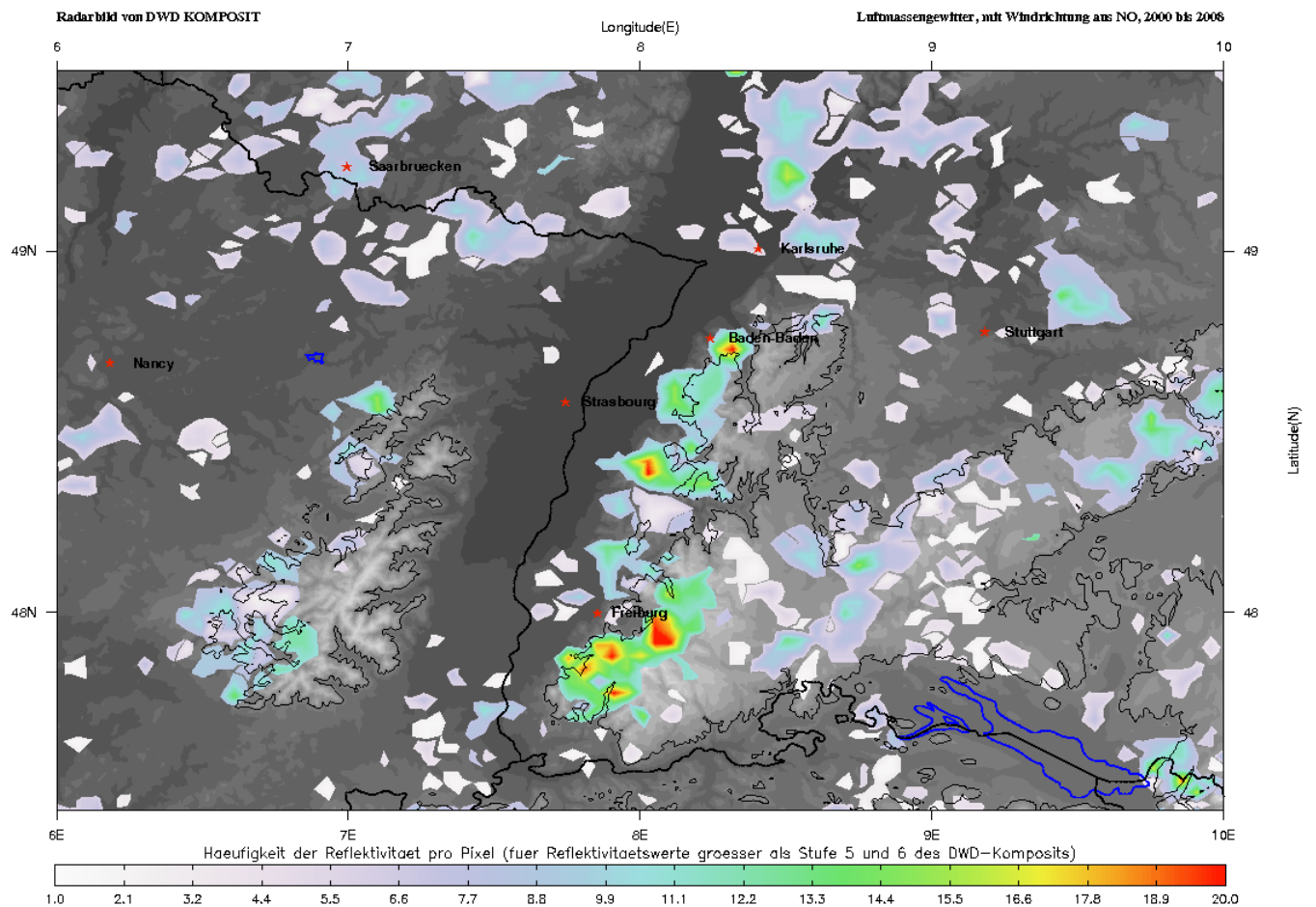


Abbildung 25: Häufigkeitsverteilung der Entstehungsorte von allen Luftmassengewitter von 2000 bis 2008 mit Windströmung aus Nordosten im 500 hPa Höhenniveau. Der farbige Balken unten im Bild zeigt die Häufigkeit der Reflektivität pro Pixel an. Es werden nur Reflektivitätswerte größer als Stufe 5 (entspricht 46 bis 55 dBZ) und 6 (entspricht > 55 dBZ) geplottet.

Im Falle einer Nordostströmung (siehe Abbildung 25) bilden sich vermehrt Gewitter in den westlichen Räumen der Gebirge. Im Schwarzwald sowohl Nord- als auch Südschwarzwald. In den Vogesen entstehen ebenfalls im Westen der Gebirge vermehrt Gewitter. Gelegentlich kommen Gewitter auch im südlichen, mit stärkeren Konzentrationen auch im nördlichen Oberrheintal vor. Auf der Schwäbischen Alb konzentrieren sich die Gewitter am ehesten im Osten und Westen des Gebirges. Im Vergleich zur Nordströmung sind die Gewitter in der Nordostströmung aber besser auf Gebiete konzentriert und nicht so stark im ganzen Osten verteilt. In Straßburg und Umgebung und generell südlich der Gebirge sind deutlich weniger Gewitter entstanden.

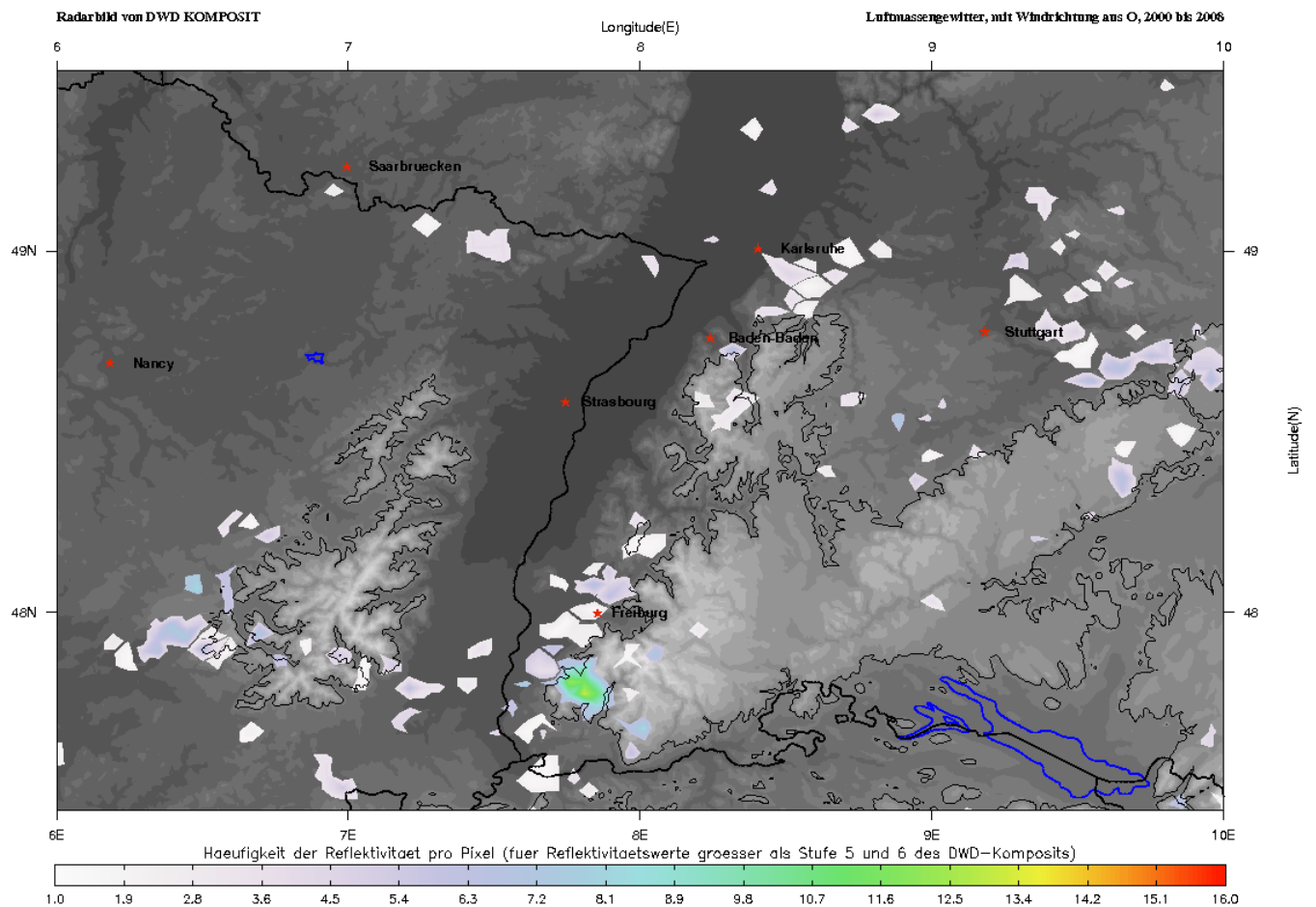


Abbildung 26: Häufigkeitsverteilung der Entstehungsorte von allen Luftmassengewitter von 2000 bis 2008 mit Windströmung aus Osten im 500 hPa Höhenniveau. Der farbige Balken unten im Bild zeigt die Häufigkeit der Reflektivität pro Pixel an. Es werden nur Reflektivitätswerte größer als Stufe 5 (entspricht 46 bis 55 dBZ) und 6 (entspricht > 55 dBZ) geplottet.

Die Entstehungsorte von Gewitter bei einer Ostströmung (siehe Abbildung 26) sind zwar nicht so gut vertreten, zeigen aber im Westen des Südschwarzwaldes und Westen sowie auch Osten der Südvogesen relativ dichte Anhäufungen auf. Im Westen des Nordschwarzwaldes und südlich von Karlsruhe sowie im Stuttgarter Raum treten kleinere Anhäufungen auf. Dagegen ist in den Nordvogesen und auch auf der Schwäbischen Alb so gut wie keine Gewitteraktivität zu beobachten. Ein möglicher Grund warum Gewitter bei einer Ostströmung eher selten sind, ist das Fehlen von warmer und feuchter Luft bei einer Ostströmung.



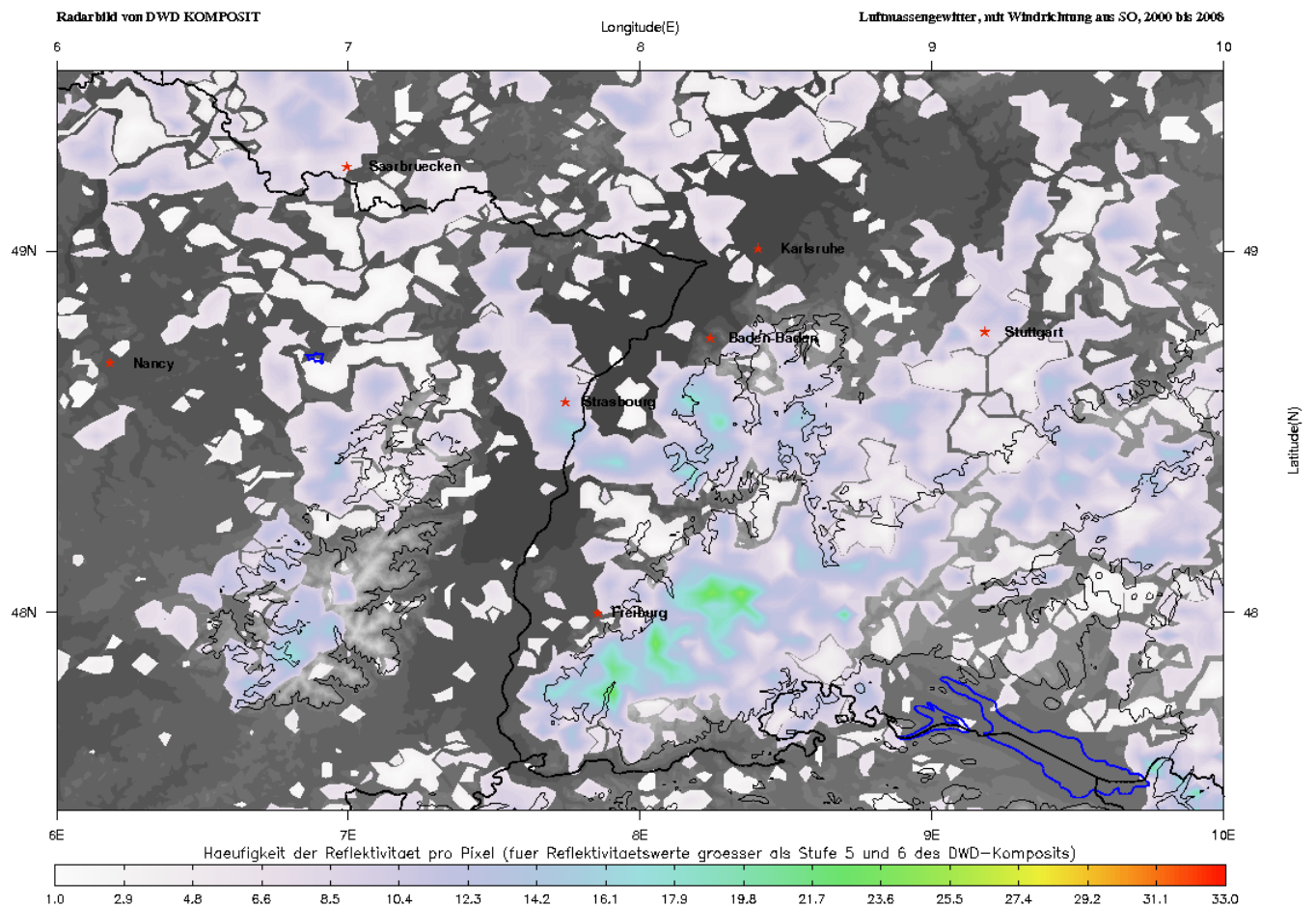


Abbildung 27: Häufigkeitsverteilung der Entstehungsorte von allen Luftmassengewitter von 2000 bis 2008 mit Windströmung aus Südosten im 500 hPa Höhenniveau. Der farbige Balken unten im Bild zeigt die Häufigkeit der Reflektivität pro Pixel an. Es werden nur Reflektivitätswerte größer als Stufe 5 (entspricht 46 bis 55 dBZ) und 6 (entspricht > 55 dBZ) geplottet.

Liegt eine Südostströmung vor (siehe Abbildung 27), so kann vermehrt Gewitteraktivität zentral im ganzen Schwarzwald Nord wie Süd, auf der Schwäbischen Alb und nördlich bis nach Stuttgart und Umgebung festgestellt werden. Mit den meisten Konzentrationen zentral verteilt über dem Südschwarzwald. Zentral auch über den Südvogesen. In den Nordvogesen befinden sich die Anhäufungen von Gewittern vermehrt im Westen sind aber auch im Osten anzutreffen. Im Westen des Nordschwarzwaldes befinden sich vermehrt Gewitteranhäufungen die sich bis nach Straßburg und auch nordöstlich der Vogesen entlang ziehen. Südlich des Schwarzwaldes und der Schwäbischen Alb ist relativ wenig Gewitteraktivität zu beobachten.

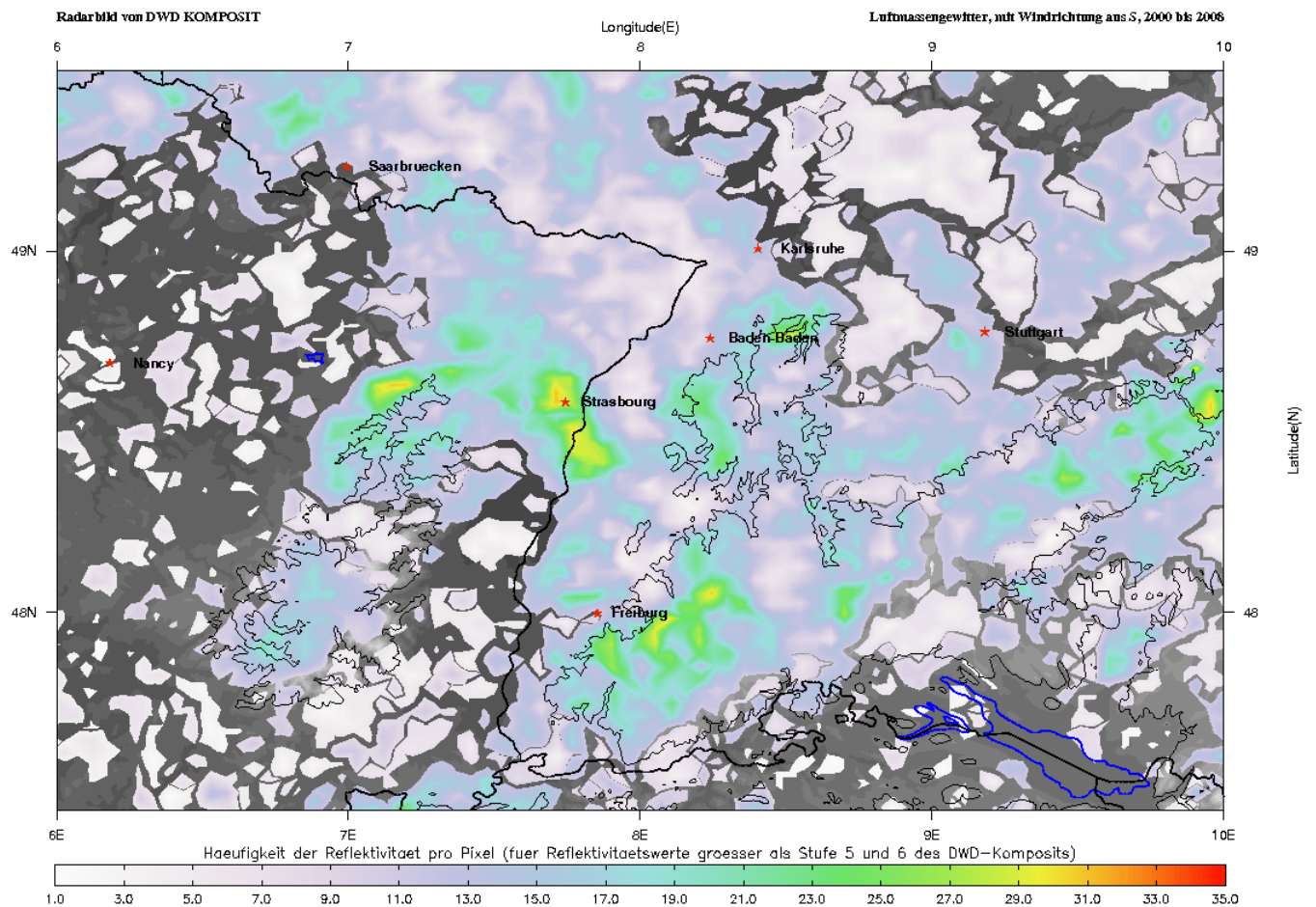


Abbildung 28: Häufigkeitsverteilung der Entstehungsorte von allen Luftmassengewitter von 2000 bis 2008 mit Windströmung aus Süden im 500 hPa Höhenniveau. Der farbige Balken unten im Bild zeigt die Häufigkeit der Reflektivität pro Pixel an. Es werden nur Reflektivitätswerte größer als Stufe 5 (entspricht 46 bis 55 dBZ) und 6 (entspricht > 55 dBZ) geplottet.

Bei einer Südströmung (siehe Abbildung 28) sind verhältnismäßig deutlich mehr Gewitteranhäufungen aufzufinden. Die Maximalwerte befinden sich vor allem auf den Gebirgen, im Südschwarzwald, und Nordschwarzwald, dort eher im westlichen und nördlichen Teil des Gebirges. Es sind auch deutliche Anzahlen im Rheingraben vertreten. Besonders in der Gegend von Straßburg. Nach [Hannesen, R., et al., 1998], [Dotzek, N., 2001] und [Adrian, G. und Fiedler, F., 1991] entstehen in diesem Gebiet Windscherungen durch wechselseitige Beeinflussung der Luftströmung und der Gebirge. Durch Süd- oder auch Südwestströmung bildet sich oft eine Konvergenzlinie, die zu vermehrter Gewitterbildung führen kann. Auf den Vogesen konzentrieren sich die Anhäufungen eher zentral über dem Gebirge im Süden und über den Nordvogesen noch mehr im Nordwesten bis nördöstlich der Vogesen. Auf der Schwäbischen Alb sind Gewitteranhäufungen direkt über dem Gebirge entlang zu finden und weisen auch noch eine kleine Tendenz nördlich des Gebirges auf. Südlich der Schwäbischen Alb und im der Gegend vom Bodensee sind vergleichsweise weniger Reflektivitätsanhäufungen.

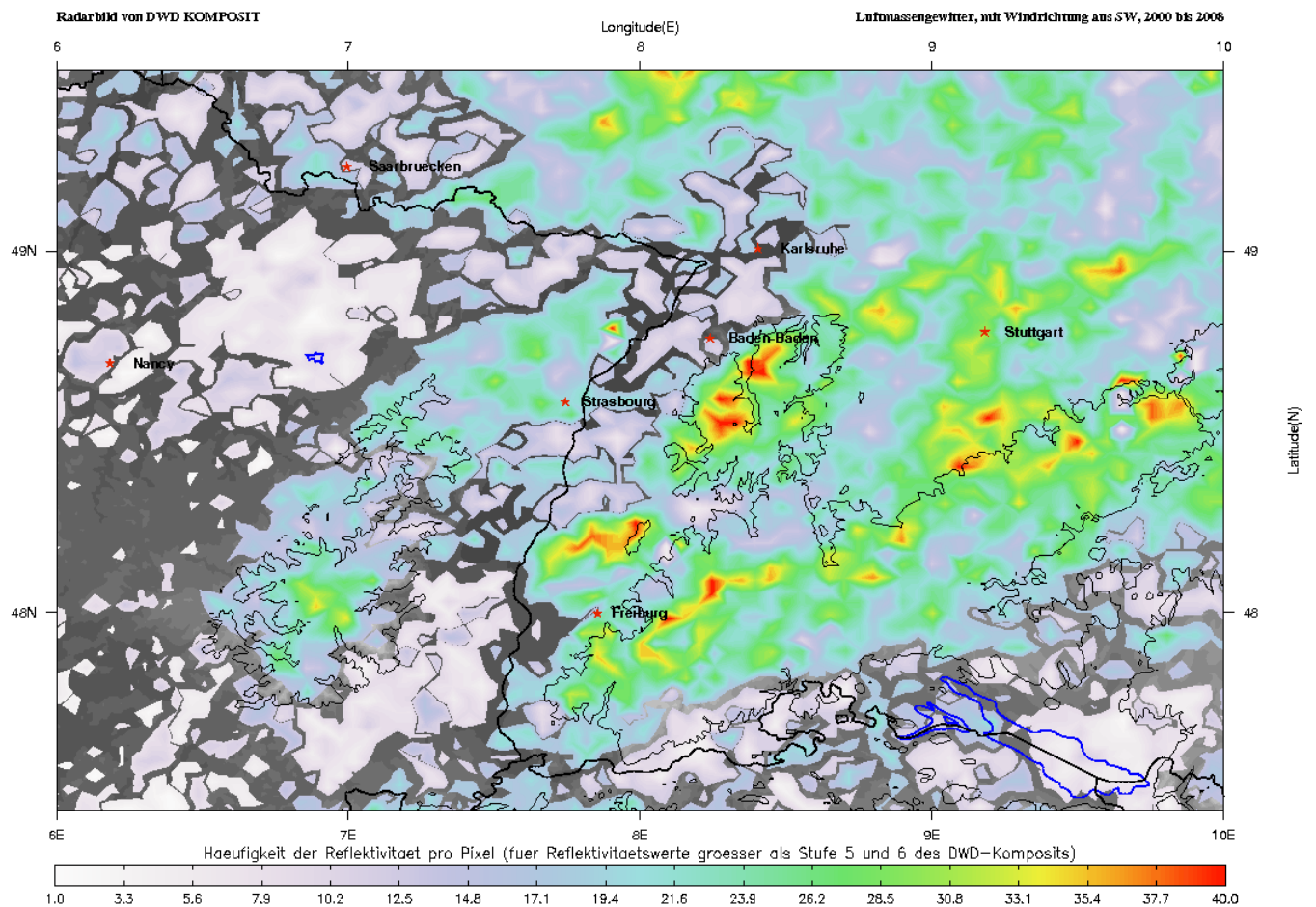


Abbildung 29: Häufigkeitsverteilung der Entstehungsorte von allen Luftmassengewitter von 2000 bis 2008 mit Windströmung aus Südwesten im 500 hPa Höhenniveau. Der farbige Balken unten im Bild zeigt die Häufigkeit der Reflektivität pro Pixel an. Es werden nur Reflektivitätswerte größer als Stufe 5 (entspricht 46 bis 55 dBZ) und 6 (entspricht > 55 dBZ) geplottet.

Besonders auffällig sind im Falle einer Südwestströmung (siehe Abbildung 29) die starken Gewitteranhäufungen entlang der Schwäbischen Alb mit Extremwerten auf der nördlichen Seite des Gebirges, sowie südlich von Stuttgart. Südlich des Schwarzwaldes und der Schwäbischen Alb sind verhältnismäßig wenige Gewitteranhäufungen vorzufinden, genauso wie im Westen der Vogesen. Zentral über den Südvogesen und im ganzen nordöstlichen Bereich der Vogesen auch bis in das Rheintal hinein treten vermehrt Gewitteranhäufungen auf. Gewöhnlich transportiert im Sommer eine Südwestströmung die vom dem Mittelmeer her kommt, warme feuchte Luft in die Region [Ludlam, F. H., 1980], die gute Voraussetzung für Gewitterbildung bringt.



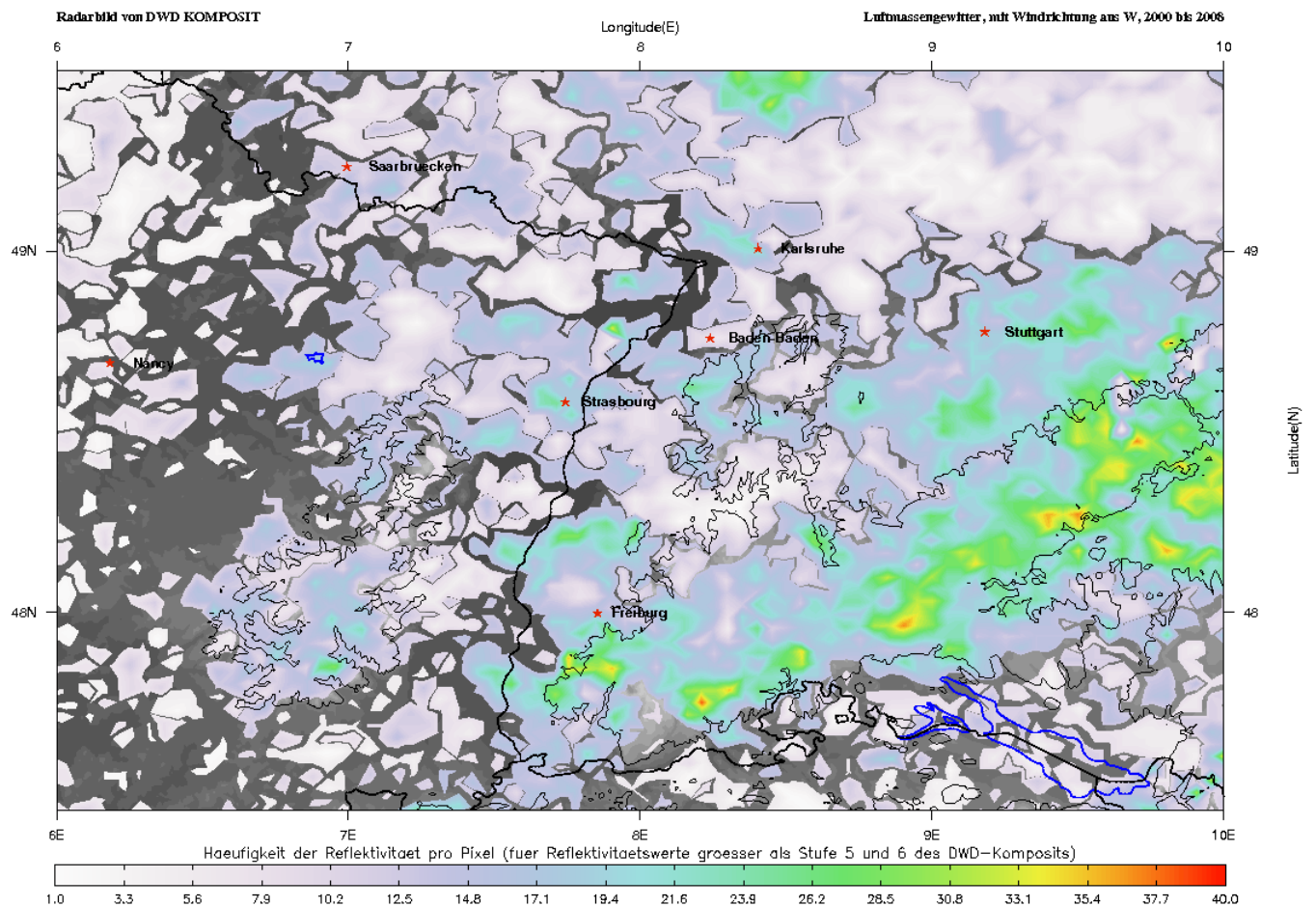


Abbildung 30: Häufigkeitsverteilung der Entstehungsorte von allen Luftmassengewitter von 2000 bis 2008 mit Windströmung aus Westen im 500 hPa Höhenniveau. Der farbige Balken unten im Bild zeigt die Häufigkeit der Reflektivität pro Pixel an. Es werden nur Reflektivitätswerte größer als Stufe 5 (entspricht 46 bis 55 dBZ) und 6 (entspricht > 55 dBZ) geplottet.

Im Vergleich zur Südwestströmung, befinden sich bei einer reinen Westströmung (siehe Abbildung 30) die Gewitteranhäufungen ebenfalls entlang der Schwäbischen Alb, mit der Änderung, dass die Extremwerte bei einer Westströmung sich mehr in südlicher Richtung verlagern und nicht wie in Abbildung 29 in den nördlichen Bereich der Schwäbischen Alb. Das Gebiet um Stuttgart herum weist eine ähnlich starke Verteilung auf, wie bei einer Südwestströmung. Nordöstlich der Vogesen, im Oberrheintal nehmen die Gewitteranhäufungen im Vergleich zur Südwestströmung wieder ab. Die Gewitter verlagern sich in den Vogesen mehr auf die Ostseite der Gebirge, außer im Nordvogesen und Südschwarzwald, dort sind sie größtenteils im Westen abgebildet. Im Norden des Nordschwarzwaldes befinden sich auch eine große Anzahl an hohen Reflektivitäten. Im Rheintal ganz nördlich, befinden sich ebenfalls große Gewitteranhäufungen.

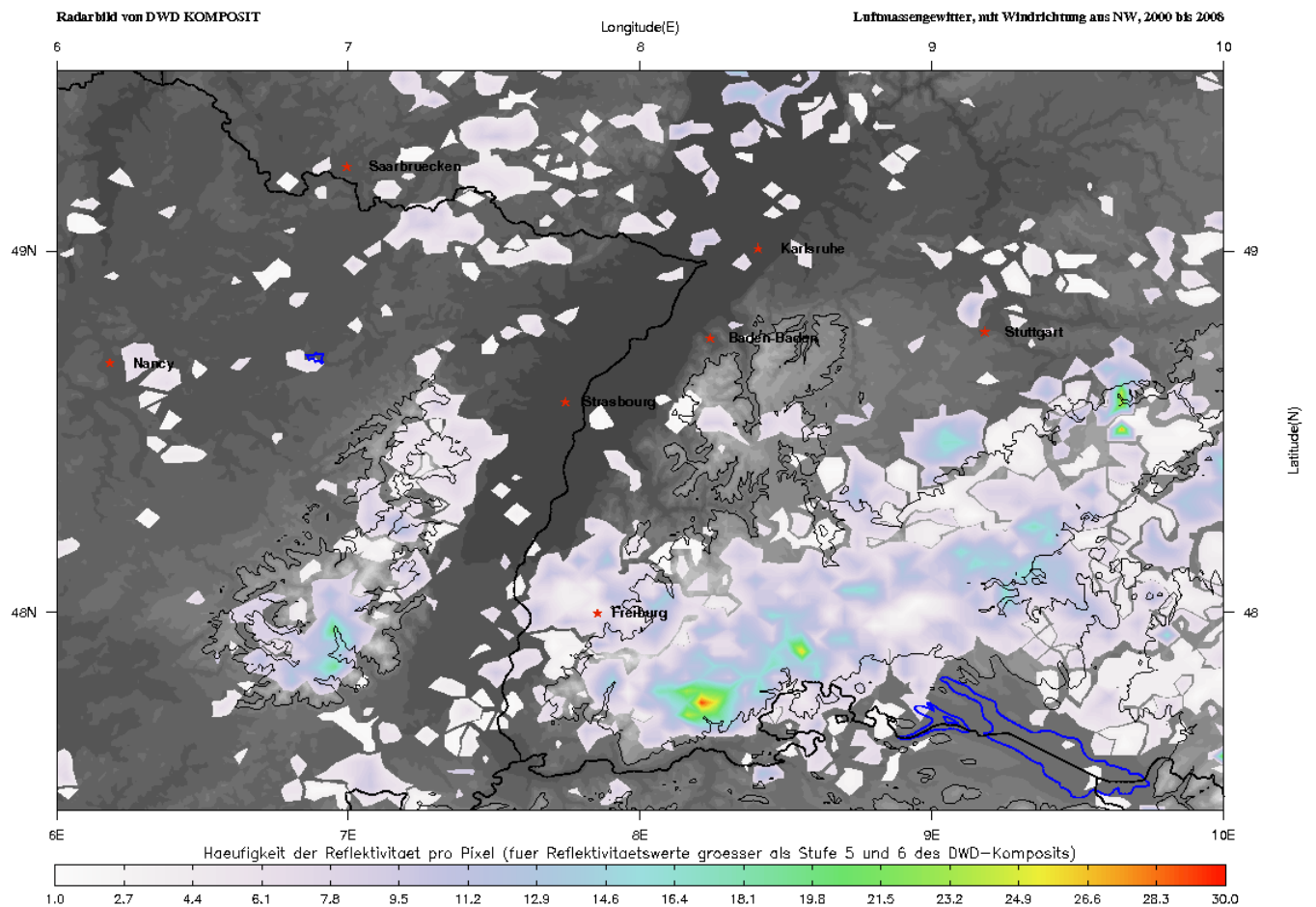


Abbildung 31: Häufigkeitsverteilung der Entstehungsorte von allen Luftmassengewittern von 2000 bis 2008 mit Windströmung aus Nordwesten im 500 hPa Höhenniveau. Der farbige Balken unten im Bild zeigt die Häufigkeit der Reflektivität pro Pixel an. Es werden nur Reflektivitätswerte größer als Stufe 5 (entspricht 46 bis 55 dBZ) und 6 (entspricht > 55 dBZ) geplottet.

Die Gewitteranhäufungen nordöstlich der Vogesen verschwinden bei einer Nordwestströmung. Dafür haben sich vermehrt Gewitter weiter südlich im Oberrheintal gebildet. Größere Konzentrationen liegen im östlichen Bereich der Vogesen vor allem in den Südvogesen. Der Schwarzwald im Norden ist kaum betroffen, hingegen weist der Südschwarzwald im Südosten einige Gewitteranhäufungen auf. Entlang der Schwäbischen Alb sind auch eher im südlichen Bereich die Gewitter vertreten.

Die Entstehungsorte der Gewitter häufen sich vor allem in den Gebirgsregionen wie den Vogesen, den Schwarzwald und auf der Schwäbischen Alb. Sie entstehen in Abhängigkeit von der Windrichtung, an unterschiedlichen Orten im Gebirge. Sowohl zentral über dem Gebirge als auch im Leebereich sind Gewitter vermehrt aufgetreten, wie auch schon von [Hagen, M., et al., 2009] beobachtet wurde. Ein Bezug zur Windgeschwindigkeit wurde hier aber nicht analysiert.

Des Weiteren wurden Gewitter beobachtet, die sich besonders bei einer Südströmung und

Südwestströmung, nordöstlich der Vogesen also im Oberrheintal gebildet haben. Diese Beobachtung stimmen mit den Analysen von [Hannesen, R., et al., 1998] überein. Ein möglicher Grund für die Bildung der Gewitter im Oberrheintal ist die Vermutung von Konvergenzzonen die sich hinter dem Gebirge bilden, verursacht durch Windscherung, nach [Adrian, G. und Fiedler, F., 1991] und [Hannesen, R., et al., 1998].

Ein Problem bei der Auswertung der Radarreflektivitäten mit einem Schwellwert größer als 46 dBZ war eine immer wiederkehrende falsche Reflektivität im Bereich von Baden-Baden und südöstlich von Stuttgart auf Höhe der Schwäbischen Alb. In diesen Bereichen treten in den Jahren 1998 und 1999 immer wieder über die Tage hinweg auf den gleichen Stellen extreme Reflektivitätswerte auf, die nicht durch Gewitter verursacht wurden. Eine denkbare Quelle dieser Fehler wäre eine Superrefraktion, verursacht durch nächtliche Inversionsschichten die bis in morgendliche Stunden andauern. Die Dichte der Atmosphäre wird unter anderem durch die Temperatur, die Luftfeuchte und Druck bestimmt. Somit kommt es zu Dichteunterschieden sowohl vertikal als auch horizontal. Dies beeinflusst die Geschwindigkeit und die Richtung der Ausbreitung der Radarwellen. Bei Zunahme der Dichte wird die Ausbreitung der Radarwellen verlangsamt und bei Abnahme der Dichte nimmt die Geschwindigkeit der Wellen zu. Durch dieses Phänomen kommt es zur Krümmung der Radarkeule. Unter normalen Bedingungen der Atmosphäre ist der Kegel ein wenig leichter als die Erdkrümmung gebogen. Dieser Zustand wird Refraktion genannt. Eine Superrefraktion entsteht, wenn die Dichte mit der Höhe langsamer als im normalen Zustand abnimmt. Bei einer Inversionschicht nimmt die Temperatur und somit die Dichte mit der Höhe sogar zu. Die Folge ist, dass die Signale zu stark gekrümmt werden, stärker als die Krümmung der Erdoberfläche und es somit zu falschen Echos durch Bodenechos kommt [Rinehart, R. E., 1991]. Diese Fehlerquelle von Radarmessungen wurde erst ab 2000 größtenteils aus den Radardaten herausgefiltert. Diese falschen Echos kennzeichnen sich durch Orte von extrem hohen Reflektivitätshäufigkeiten aus. Sie verfälschen die Verteilung der Entstehungsorte von Luftmassengewitter. Bei dem Versuch des Herausfilterns von extrem hohen Häufigkeitswerten muss darauf geachtet werden, dass im Falle von tatsächlich hohen Gewitteranhäufungen der maximale Wert der Häufigkeit nicht so weit abgeschnitten wird, dass die richtigen Gewitteranhäufungen mit herausgefiltert werden. Daher wurde entschieden alle Auswertungen für die Entstehungsorte ohne die Jahre 1998 und 1999 zu wiederholen, die letztendlich auch in den Abbildungen 23 bis 31 dargestellt sind.

#### **4.3.5 Entstehungszeit**

Nachdem die Entstehungsorte untersucht wurden sind nun auch die Entstehungszeiten von Luftmassengewitter interessant. Dazu wird zunächst für das gesamte Gebiet die Entstehungszeit von allen Luftmassengewittern ermittelt, indem bei den Radardaten wie im vorangegangenen Abschnitt nur die Reflektivitätswerte genutzt werden die größer gleich Stufe 5 sind. Somit kann auch gleich die Zeit angegeben werden in der die Reflektivitätswerte auftreten. Die zeitliche Häufigkeitsverteilung aller Luftmassengewitter wird in Abbildung 32 gezeigt. Dabei werden die Entstehungszeiten von Einzelzellen-, Multizellen- und Superzellengewitter in Abbildung 33 zusätzlich unterschieden.

Es ist aber zu beachten, dass nicht nur die Entstehungszeiten, sondern generell die Zeiten angegeben werden, an denen die Reflektivitätswerte über den Schwellwert auftreten.

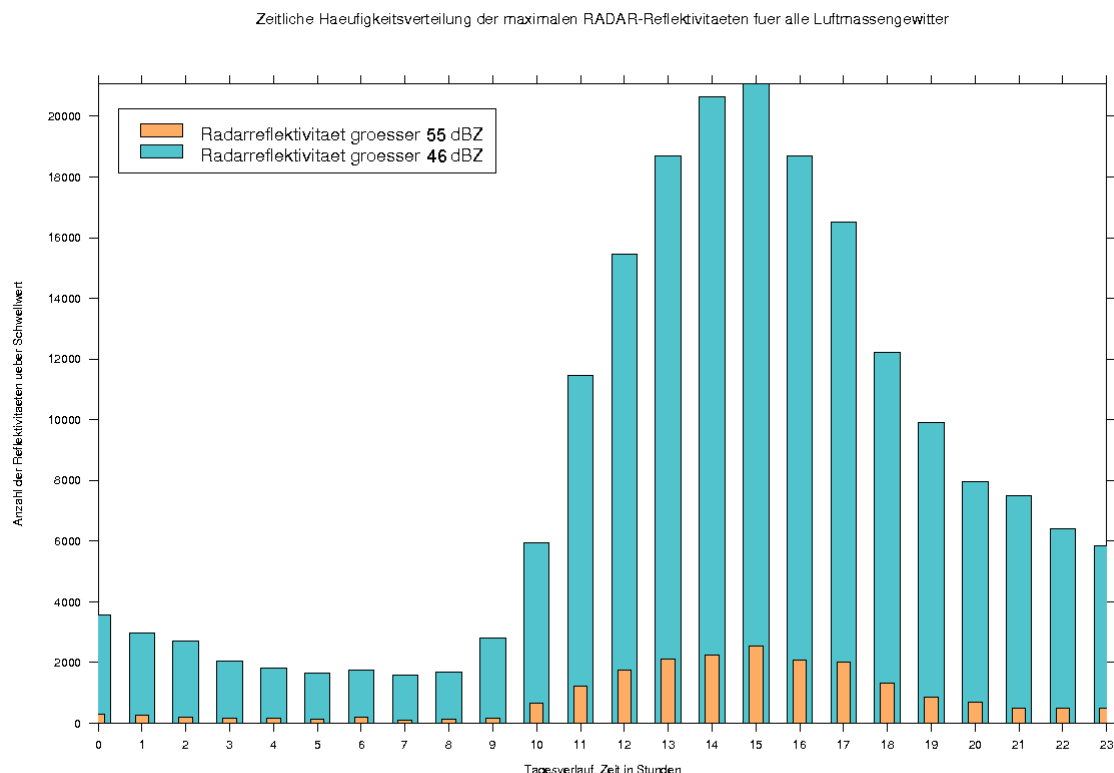


Abbildung 32: Zeitliche Häufigkeitsverteilung der Radarpixel über dem Schwellwert für alle Luftmassengewitter. Auf der Abszisse ist ein Tagesverlauf in Stunden angegeben. Der Tag verläuft von Null Uhr bis 23 Uhr 59. Auf der Ordinate stehen die Häufigkeiten der Reflektivitätswerte die über den Schwellwert liegen. Der Schwellwert liegt bei 46 bis 55 dBZ für die blauen Balken, und ab 55 dBZ bei den orangenen Balken. Die Zeit wird in UTC angegeben.

Die blauen Balken stellen Gewitter dar, die Reflektivitätswerte zwischen 46 dBZ bis 55 besitzen, somit kennzeichnen sie eher kleinere Gewitter beziehungsweise Gewitter die möglicherweise noch nicht ihre volle Leistung erreicht haben. Die orangenen Balken stehen für Reflektivitätswerte die größer als 55 dBZ sind. Sie können durchaus heftigere Luftmassengewitter die auch schon Hagel mit sich ziehen können gut darstellen.

Der Bezug zu den unterschiedlichen Luftmassengewitter Typen wurde bei Einzelzellen und Multizellen allein durch die kurze beziehungsweise lange Lebensdauer ermittelt (siehe Abschnitt 4.3 ) und ist daher nicht stellvertretend für die blauen und orangenen Balken bei den Entstehungszeiten, sondern wird in der Abbildung 33 separat betrachtet.

Generell kann man bei der Betrachtung von allen Luftmassengewitter mit einer Entstehungszeit von etwa 10 Uhr ausgehen. Die Hauptzeit in der Gewitter am stärksten vertreten sind ist um 15 Uhr. Sowohl für Reflektivitätswerte der Stufe 5 als auch für Stufe 6. Aufgrund einer recht guten Übereinstimmung zwischen den zwei Schwellwerten von Stufe 5 und Stufe 6, werden im folgenden nur die Werte der Stufe 5 weiter betrachtet.

In Abbildung 33 werden alle drei Typen von Luftmassengewittern, prozentual normiert übereinander gelegt. Dabei ist zu erwähnen, dass die maximalen Anzahlen der mit der Stufe 5 und 6 pro Radarpixel liegenden Radarmessungen von Einzelzellengewitter bei

5600 liegt, dass bedeutet 5600 mal wurde im gesamten COPS Gebiet im Falle aller Einzelzellengewittertage die Reflektivität größer als 46 dBZ erreicht. Der Wert im Falle von Multizellengewitter liegt bei 13250 und im Falle von Superzellengewitter bei 2200.

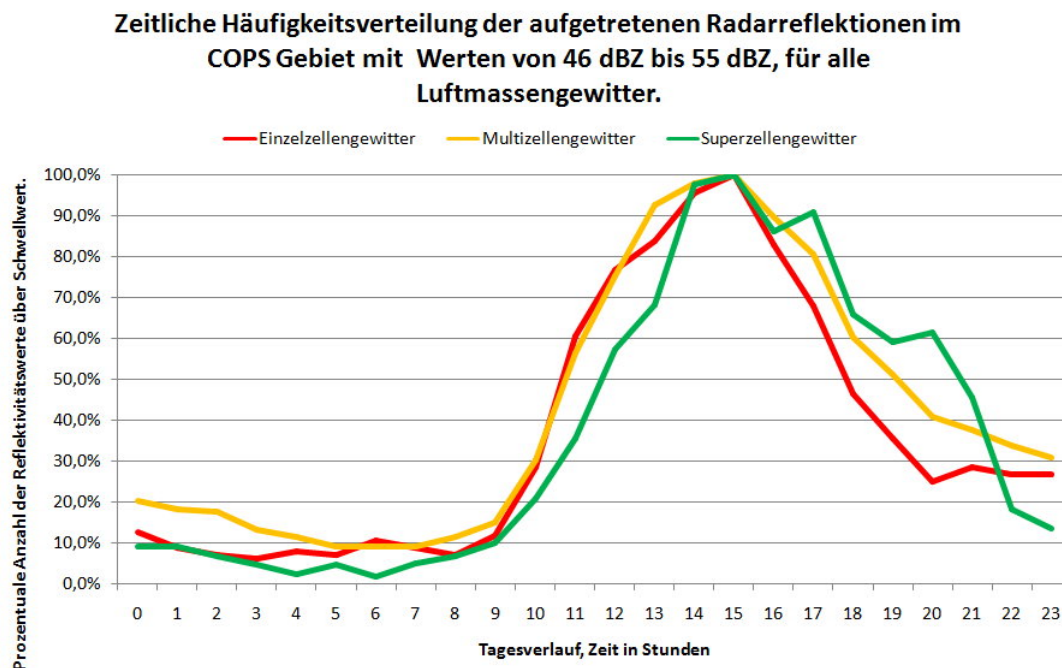


Abbildung 33: Zeitliche Häufigkeitsverteilung der maximalen Radarreflektivitäten prozentual normiert für alle Einzelzellengewitter (rote Linie), Multizellengewitter (gelbe Linie) und Superzellengewitter (grüne Linie). Auf der Abszisse ist ein Tagesverlauf in Stunden dargestellt. Der Tag verläuft von 00:00 UTC bis 23:59 UTC. Auf der Ordinate steht die prozentuale Anzahl der Reflektivitätswerte über dem Schwellwert von 46 dBZ bis 55 dBZ.

Die Entstehung von Gewitter setzt sowohl für Einzelzellen als auch für Multizellen etwa um 10 Uhr ein. Die Bildung von Superzellengewitter beginnt etwa zwischen 10 bis 11 Uhr. Sowohl für Einzelzellengewitter als auch für Multizellen- und Superzellengewitter liegt um 15 Uhr die größte Anhäufung von Gewitter vor. Einzelzellengewitter vergehen nach dem Hauptmaximum um 16 Uhr relativ schnell wieder. Multizellengewitter sind noch etwa eine Stunde länger präsent. Superzellengewitter sind sogar bis in die Abendsstunden anwesend.

Bei dem Vergleich von allen drei Luftmassengewitter Typen (Einzelzellen, Multizellen und Superzellen) erkennt man demnach am Nachmittag von Einzelzellen- über Multizellen- zu Superzellengewitter eine leichte Verlagerung in Richtung späterer Zeit. Vermutlich hängt die hohe Häufigkeit von Multi- und Superzellengewitter am späten Nachmittag mit der längeren Lebensdauer zusammen. Einzelzellen sind recht kurzlebig, wenn sie gegen Mittag entstehen werden sie sich auch recht früh wieder auflösen. Multizellen und Superzellengewitter hingegen können eine Lebensdauer von mehreren Stunden aufweisen. Wenn diese Gewitterzellen um den Mittag herum entstehen werden sie möglicherweise auch noch am späten Nachmittag und Abend hohe Reflektivitätswerte aufweisen die in die Auswertung mit hineingehen.



### 4.3.6 Orografische Aufteilung

In Abschnitt 4.3.4 wurden die Entstehungsorte von Gewitter in Abhängigkeit der Windrichtung analysiert. Dabei sind Gebiete wie der Nord- und Südschwarzwald, die Schwäbische Alb, die Vogesen eingeteilt in Nord- und Südvogesen vermehrt als Entstehungsorte für Gewitter aufgefallen. Im folgenden wurde versucht, das ganze COPS Gebiet sinnvoll in kleinere Gebiete zu unterteilen um spezifisch für diese Gebiete die Entstehungszeiten von Gewitterbildungen mittels der Radarreflektivitäten zu bekommen. Dabei wurden die zeitlichen Angaben der aufgetretenen Radarreflektivitäten über dem Schwellwert von 46 dBZ aufgezeichnet. Es wurden alle Luftmassengewitter betrachtet. Eine Unterteilung in Einzelzellen-, Multizellen oder Supercellengewitter wurde nicht explizit vorgenommen. Die Einteilung der Gebiete ist in Abbildung 34 dargestellt.

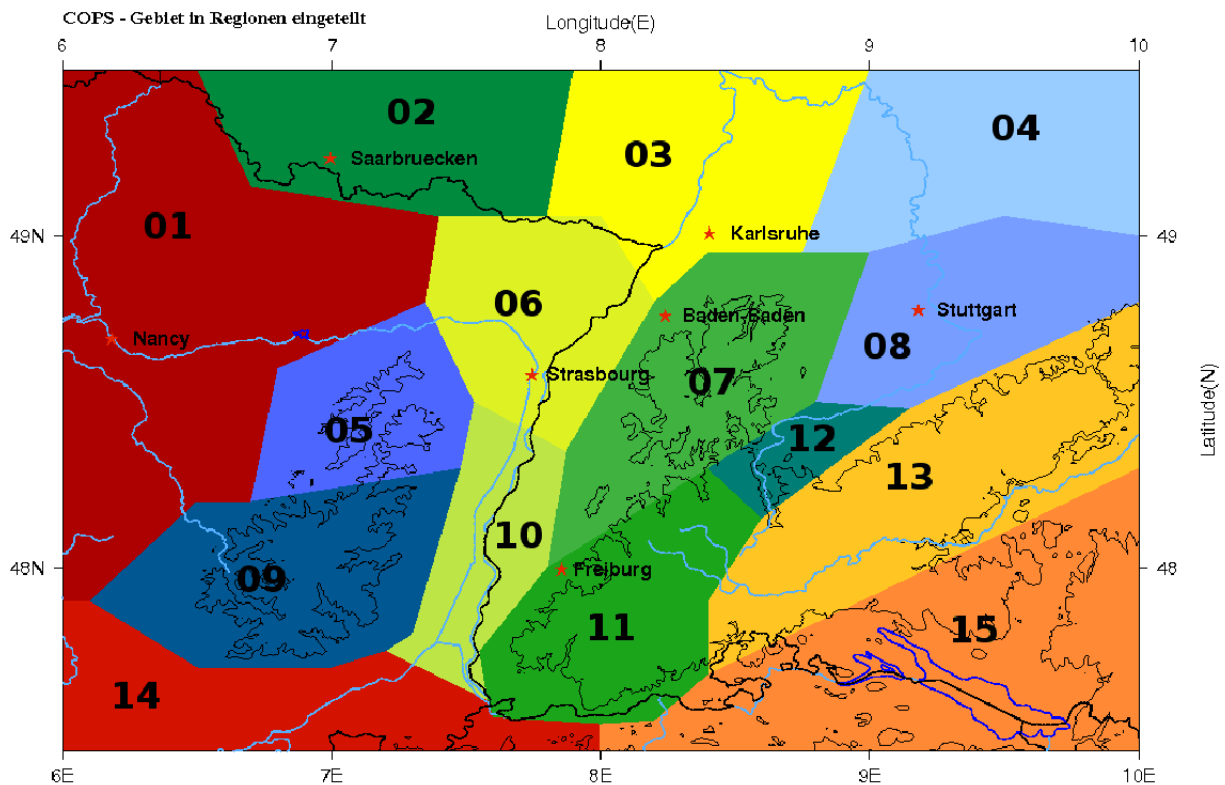


Abbildung 34: Topografische Karte des COPS Gebietes. Eingezeichnet sind die 600 m Höhenlinie zur Orientierung der Gebirge als dünne schwarze Linien, die Ländergrenzen zwischen Frankreich, Deutschland und der Schweiz als große schwarze Linie, sowie Flüsse und Seen mit blauen Linien. Das COPS Gebiet ist in 15 Regionen eingeteilt, die farblich unterschieden werden.

Die unterschiedlichen Regionen haben teils große Varianzen im Bezug zur Gewitteraktivität. Dies wird verursacht durch unterschiedliche Regionen und ihre Größen. Beispielsweise weist die Region 01 (Lothringen) nicht so viel Gewitteraktivität auf wie die Region 11 (Südschwarzwald). Dadurch dass die Region 01 flächenmäßig aber größer ist, beträgt die Gesamtanzahl der Reflektivitäten mehr als die in der Region 11. Eine Übersicht der

Größen der einzelnen Flächen in Quadratkilometer wird in Tabelle 8 dargestellt. Eine Normierung von allen Regionen auf die Größe der Flächen wurde durchgeführt und liefert die normierte maximale Anzahl der Reflektivitäten pro Quadratkilometer der einzelnen Regionen (siehe Abbildung 35). Dadurch lässt sich im Hinblick auf alle 15 Regionen sagen, welche Region besonders viele Gewitter aufweisen und welche Region eher wenig Gewitteraktivität besitzen.

Region Nr.:	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10
Flächengröße in $\frac{km^2}{1000}$	9,5	3,8	4,2	4,1	2,4	3,1	4,1	3,4	4,2	2,1
	11	12	13	14	15					
	3,5	0,8	5,5	3,7	6,9					

Tabelle 8: Gerundete Flächengrößen in tausend Quadratkilometer der einzelnen Regionen im COPS Gebiet.

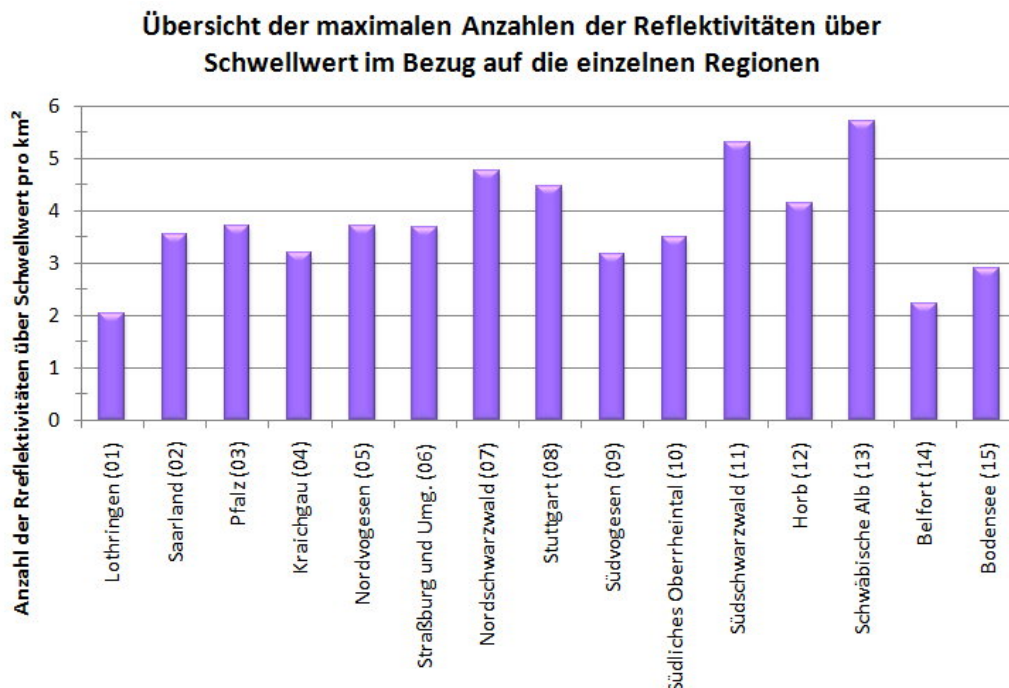


Abbildung 35: Normierte Anzahl der Reflektivitäten über Schwellwert von 46 dBZ pro Quadratkilometer für alle einzelnen Regionen.

Aus Abbildung 35 ist erkennbar, dass Gebirgsregionen wie die Schwäbische Alb, Südschwarzwald und Nordschwarzwald besonders viel Gewitteraktivität aufweisen. Die Randgebiete im Süden und Westen, wie der Bodensee und Umgebung sowie das Gebiet um Belfort herum, weisen deutlich weniger Gewitteraktivität auf, als Regionen die nördlicher liegen. Möglicherweise wird das hervorgerufen durch die Hauptwindrichtung aus Südwest mit resultierenden Gewitterbildungen vorwiegend im Leebereich der Gebirge, siehe auch [Hagen, M., et al., 2009], sowie in Abschnitt 4.3.4.

Auffallend ist aber, dass die Südvogesen erstaunlich wenig Gewitteraktivität aufweisen, obwohl sie bei den vorherigen Abbildungen der Entstehungsorte immer gut vertreten waren. Möglicherweise wurde hier die Region 09 der Südvogesen zu groß gewählt, sodass

noch Gebiete aus der Ebene, in denen sich weniger Gewitter bilden mit einbezogen worden sind. Sie vertreten somit eine größere Fläche, die sich bezogen auf die maximalen Anzahl der Reflektivitäten pro Quadratkilometer insgesamt reduzieren.

Die meisten Gewitter entstehen in den Gebirgen. Aufgrund großer Unterschiede zwischen Gebirgen und Ebenen, werden im folgenden die Regionen in sinnvoll erscheinende Gruppen eingeteilt.

Eine interessante Gruppe scheint, aufgrund der Informationen von Entstehungsorten (siehe Abschnitt 4.3.4), die Regionen 05, 06, 07, 09, 10 und 11 zu bilden. Diese Gruppe repräsentiert das "zentrale COPS Gebiet" und beinhaltet Gebirgsregionen sowie Teile des Oberrheingrabels.

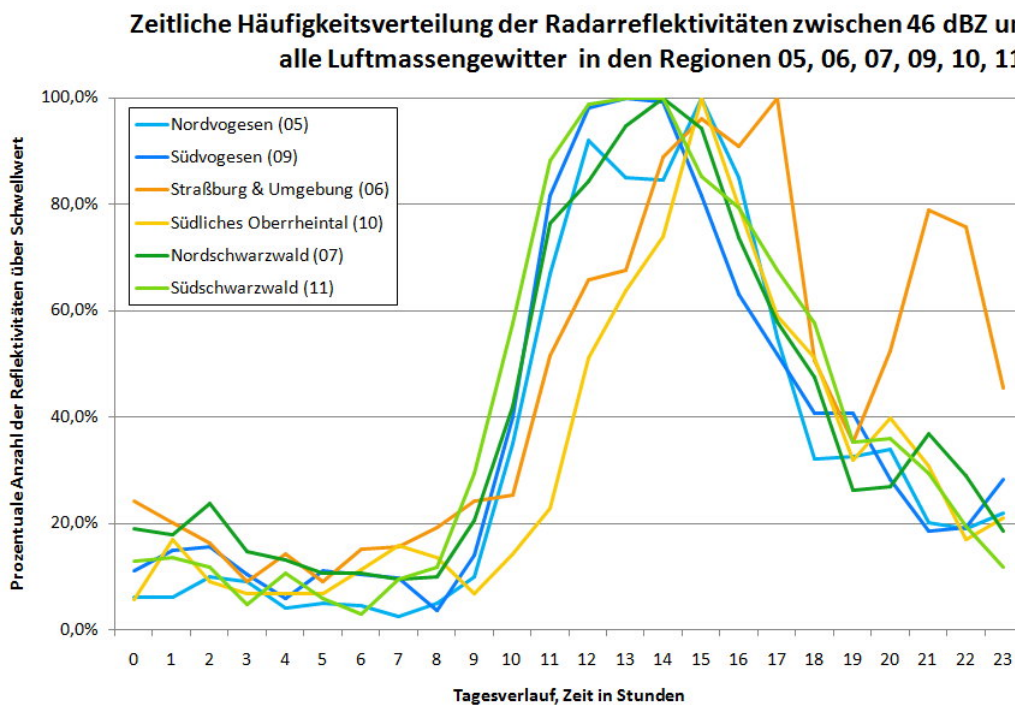


Abbildung 36: Zeigt die prozentual normierte, zeitliche Häufigkeitsverteilung aller Luftmassengewitter für die Regionen 05, 06, 07, 09, 10, 11. Auf der Abszisse ist der Tagesverlauf in Stunden dargestellt, die Ordinate gibt die prozentuale Anzahl der Reflektivitäten über den Schwellwert von 46 dBZ bis 55 dBZ an. Die Regionen im Schwarzwald entsprechen grünen Linien, die Regionen in den Vogesen entsprechen blauen Linien und die des Rheintals entsprechen orangenen Linien. Zeitangaben sind in UTC.

In Abbildung 36 ist auf den ersten Blick zu erkennen, dass die zwei Gebiete im Rheintal zu einer deutlich späteren Zeit zwischen 11 und 12 Uhr mit Gewitterbildung einsetzten, als die Regionen in den Gebirgen. Außerdem ist für die Region 06 (Straßburg und Umgebung) erst deutlich später die Hauptgewitteraktivität erreicht, etwa gegen 17 Uhr. Danach sinkt sie relativ zügig ab, bekommt dann gegen Abend erneut einen Gewitteraufschwung.

Eine mögliche Ursache der zweiten Gewitteraktivität gegen Abend ist, dass es sich vielleicht um langlebige Gewitter handelt, die Rede ist von Superzellengewitter, die möglicherweise in diesem Gebiet entstehen. Zumindest besteht in dieser Region nach [Wegener, 1917] und [Hannesen, R., et al., 1998] eine Tornadoallee. Allerdings ist die Zeit des zweiten Gewitteranstiegs ab 19 Uhr recht spät und es ist daher fragwürdig, ob sich die Gewitter



so spät noch in diesem Gebiet aufhalten, da nach [Dotzek, N., 2001] von einer Tornado Entstehungszeit zwischen 15- 19 Uhr ausgegangen wird.

Die Gewitteraktivität in den Gebirgen setzt zwischen 9 Uhr und 10 Uhr ein, wobei sie im Schwarzwald eher um 9 Uhr beginnt und in den Vogesen etwa um 10 Uhr. Um ein übersichtlicheres Diagramm zwischen den Gebirgen untereinander zu bekommen, werden die zusammenhängenden Gebirge einzeln betrachtet.

Die Regionen Vogesen und Schwarzwald sind beide an Gebirge gekoppelt.

Die Unterschiede zwischen Nord- und Südvogesen sind in Abbildung 37 dargestellt.

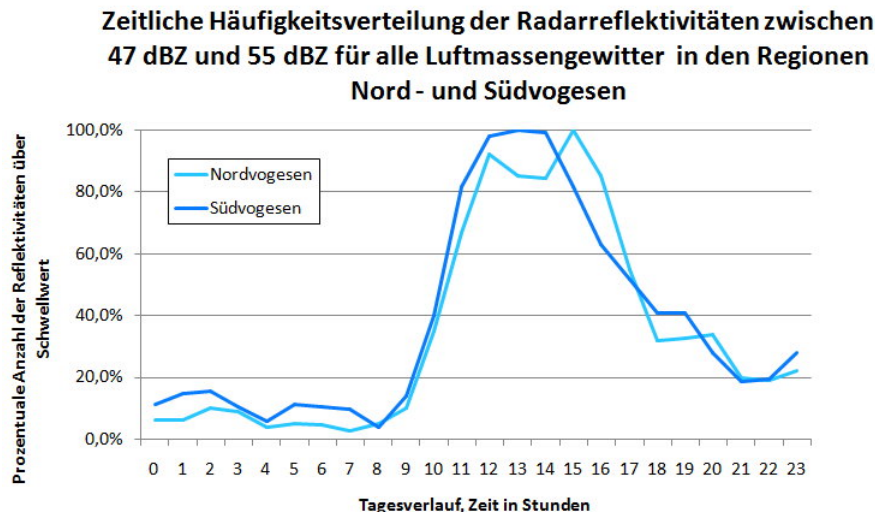


Abbildung 37: Zeigt die prozentual normierte, zeitliche Häufigkeitsverteilung aller Luftmassengewitter für die Regionen Nordvogesen (Region 05) und Südvogesen (Region 09). Auf der Abszisse ist der Tagesverlauf in Stunden dargestellt, die Ordinate gibt die prozentuale Anzahl der Reflektivitäten über den Schwellwert von 46 dBZ bis 55 dBZ an. Zeitangaben sind in UTC.

Die höchsten Erhebungen in den Nordvogesen (Region 05) liegen bei 1000 Metern in den Nordvogesen und im Gegensatz zum Nordschwarzwald gibt es in diesem Gebirge vorwiegend waldfreie Flächen vor allem an den Gipfeln. Wie schon bei der Analyse der Entstehungsorte in Kapitel 4.3.4 ermittelt wurde, charakterisiert die Region 05 ein Gebiet mit häufigen Gewitteraktivitäten. Die Entstehungszeiten von Gewittern setzen etwa um 10 Uhr ein, erreichen ihre Hauptzeit zwischen 12 und 16 Uhr mit der größten Anzahl von Gewitter um 15 Uhr. Ab 17 Uhr nimmt die Gewitteraktivität relativ zügig wieder ab. Zwischen 4 und 7 Uhr ist am wenigsten Gewitteraktivität zu beobachten.

Die Südvogesen vertreten durch die Region 09 kennzeichnen im Vergleich zu den Nordvogesen ebenfalls eine Region mit waldfreien Gipfeln. Die höchsten Erhebungen der Gebirge erreichen in dieser Region etwa 1400 Meter. Gewitter beginnen sich in dieser Region wie die Nordvogesen um 10 Uhr zu bilden. Vielleicht sogar noch etwas früher etwa kurz vor 10 Uhr. Die zeitliche Häufigkeitsverteilung der Luftmassengewitter erreicht zwischen 11 und 13 Uhr ihren Höhepunkt. Ab etwa 15 Uhr sinkt dagegen die Gewitteraktivität schon wieder ab. Die niedrigsten Gewitteraktivitäten liegen vergleichbar bei den Nordvogesen zwischen 4 und 8 Uhr.

Eine Abhängigkeit der Entstehungszeit lässt sich bei den Vogesen vermuten. So bilden sich zum Beispiel in den Vogesen die Gewitter im Süden etwas früher als im Norden. Ein

möglicher Grund ist vielleicht die Erhebung des Gebirges. Im Süden weisen die Gebirge eine Maximalhöhe von 1400 Metern auf, im Norden dagegen nur 1000 Meter. Vielleicht wird dadurch im Süden, im Falle einer vorhandenen Kappinversion diese schon früher überwunden, als im Norden, wo die Auslösetemperatur zur gleichen Zeit möglicherweise noch nicht erreicht wurde.

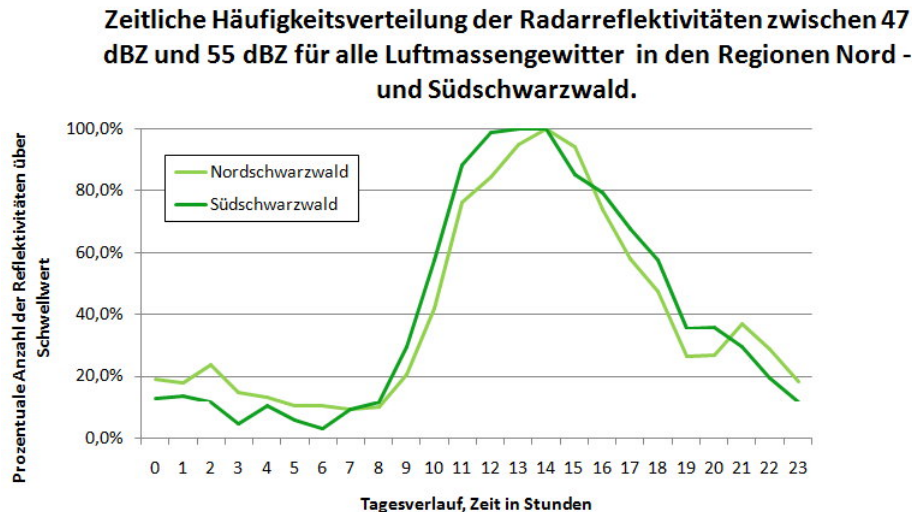


Abbildung 38: Zeigt die prozentual normierte, zeitliche Häufigkeitsverteilung aller Luftmassengewitter für die Regionen Nordschwarzwald (Region 07) und Südschwarzwald (Region 11). Auf der Abszisse ist der Tagesverlauf in Stunden dargestellt, die Ordinate gibt die prozentuale Anzahl der Reflektivitäten über den Schwellwert von 46 dBZ bis 55 dBZ an. Zeitangaben sind in UTC.

Der Vergleich zwischen Nord- und Südschwarzwald wird in Abbildung 38 dargestellt.

Charakteristisch für den Nordschwarzwald sind die dicht besiedelten Wälder. Zwischen 9 und 10 Uhr starten oft die Gewitterentstehungen. Die Hauptgewitterzeit liegt zwischen 13 und 15 Uhr. Ab 16 Uhr sinken die Gewitteranzahlen relativ zügig. Ein Minimum der Gewitteraktivität ist etwa um 7 Uhr erkennbar.

Der Südschwarzwald liegt etwas höher als der Nordschwarzwald, besitzt aber nicht so viel Waldlandschaft. Die Gewitter beginnen sich ab 9 Uhr zu bilden. Aus der Grafik ist ersichtlich, dass sie etwas früher entstehen als im Nordschwarzwald. Auch besteht die Hauptgewitterzeit etwas früher, zwischen 11 Uhr und 14 Uhr. Ab 15 Uhr beginnt die Gewitteraktivität nachzulassen, sie bleibt aber dennoch ein wenig länger bestehen als die Gewitter im Nordschwarzwald. Sehr wenig Gewitter finden sich um 3 Uhr und 6 Uhr.

Im Norden treten die Hauptgewitterzeiten zwischen 13 und 15 Uhr auf. Im Süden dagegen schon zwischen 11 Uhr und 14 Uhr. Mögliche Ursachen dafür könnten wieder die Höhenunterschiede sein. Eine weitere Vermutung wäre die Vegetation. Das bedeutet, die ganze Energie der Sonne geht zunächst in die Verdunstung der Feuchte, durch die Wälder im Nordschwarzwald ein. Erst später wird die Sonnenenergie für die Erwärmung des Bodens und der darüberliegenden Luftschichten genutzt. Daher ist es möglich, dass die Auslösetemperatur für Gewitter erst später erreicht wird als wie zum Beispiel im Südschwarzwald, der nicht so stark bewaldet ist und somit weniger Feuchte verdunsten muss. Eine bessere Beschreibung zu den Gebirgen befindet sich in Abschnitt 3.1.1.

Die restlichen Gebiete bilden die zweite Gruppe. In ihr befinden sich alle Randgebiete, die Schwäbische Alb mit eingeschlossen sowie die Region 12, die nach Beobachtung der

zeitlichen Verlaufslinie in Abbildung 39 mit zur Schwäbischen Alb dazu gerechnet werden könnte.

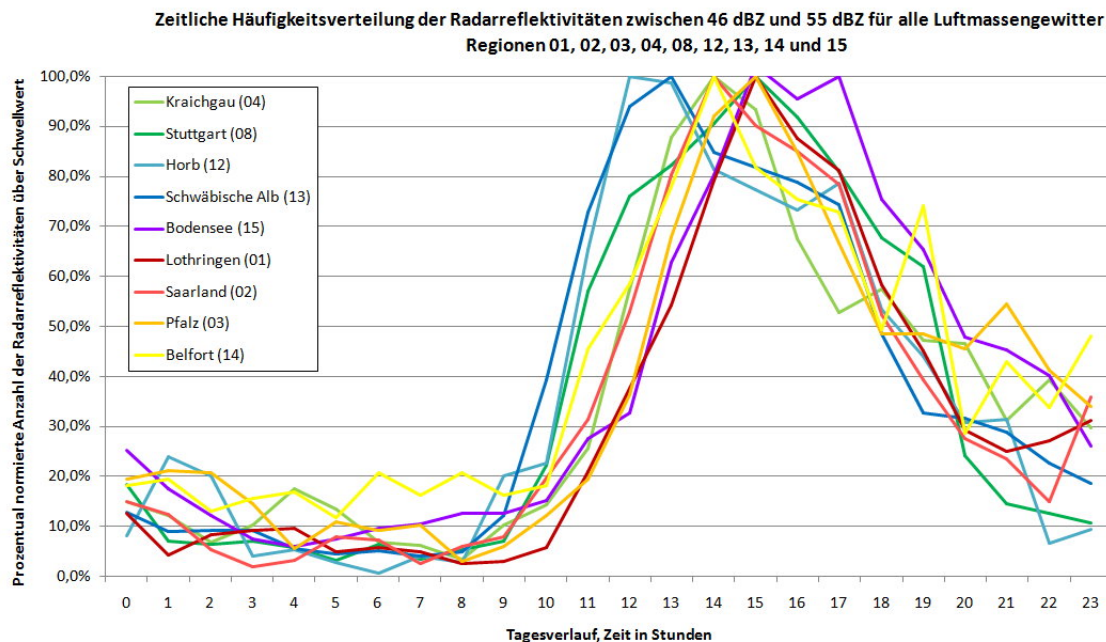


Abbildung 39: Prozentual normierte, zeitliche Häufigkeitsverteilung der Radarreflektivitäten zwischen 46 dBZ und 55 dBZ, für alle Luftmassengewitter in den Randregionen des COPS Gebietes sowie die Schwäbische Alb. Zeitangaben sind in UTC.

In der Abbildung der Randregionen erkennt man eine durchschnittlich spätere Zeitentwicklung von Luftmassengewittern. Es treten Werte zwischen 11 Uhr und 12 Uhr auf. Mit Ausnahme der Schwäbischen Alb sowie die Region 12. Dort beginnen sich Gewitter vergleichsweise mit den anderen Gebirgen, wie der Schwarzwald oder auch die Vogesen schon zwischen 9 und 10 Uhr zu bilden.

Aus allen Entstehungszeiten sowohl für die Gebirgsregionen als auch die Randgebiete ist ersichtlich, dass sich in Regionen mit Gebirgen die Gewitter durchaus etwas früher bilden, als in Ebenen Regionen. Somit scheinen die Gebirge tatsächlich einen großen Einfluss auf die Auslösungen von Luftmassengewitterbildungen zu haben.

## 4.4 Frontensysteme

Sobald eine Front in der Bodenwetterkarte aufzufinden ist und auf den Radarbildern ein Band mit viel Niederschlag und hohen Reflektivitätswerten durchgezogen ist und auf den Blitzbildern viel Blitzaktivität flächenmäßig zu erkennen ist, wird dieser Tag als Frontengewitter eingeteilt.

Die meisten Frontengewitter entstehen bei einer West bis Südwestströmung, bei einer typischen Frontenwetterlage mit starker trogvorderseitiger südwestlicher Höhenströmung. Die Gewitter sind nicht unabhängig, vergleiche Abbildung 42, allerdings sind sie nicht so stark abhängig wie Luftmassengewitter. In der Nacht sind ebenfalls Gewitterbildungen möglich.

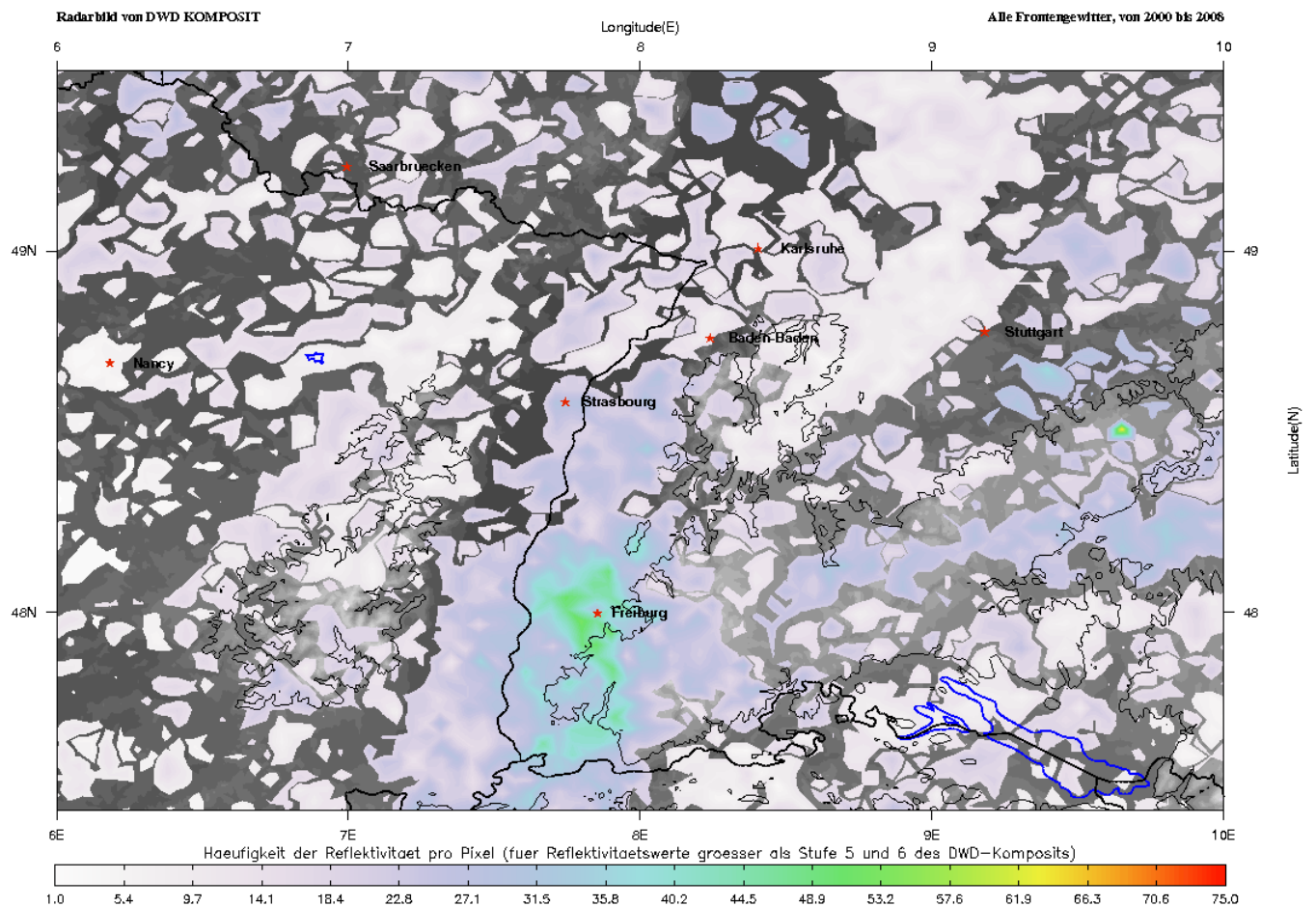


Abbildung 40: Hauptgewitteraktivität von allen Frontengewittertagen für den Zeitraum Mai bis August von 2000 bis 2008. Der farbige Balken unten im Bild zeigt die Häufigkeit der Reflektivität pro Pixel an. Es werden nur Reflektivitätswerte gleich Stufe 5 (entspricht 46 bis 55 dBZ) und Stufe 6 (entspricht größer als 55 dBZ) geplottet.

Die meisten Fronten die bei Gewittern beobachtet wurden waren Kaltfronten. Nur in seltenen Fällen wurde Gewitter an einer Okklusion oder Warmfront beobachtet.

In Abbildung 40 sind die Auftretensorte von allen Frontengewitter die zwischen Mai und August in den Jahren 2000 und 2008 aufgetreten sind dargestellt. Eine auffällige Beobachtung ist eine große Ansammlung von Frontengewitter im Luv des Südschwarzwaldes bei Freiburg und in der Oberrheinischen Tiefebene. Möglicherweise scheinen sich dort Frontengewitter besonders auszubilden. Eine detailliertere Analyse wie bei den Luftmassengewitter wurde nicht unternommen. Es treten zwar Effekte an Gebirgen auf, wie zum Beispiel die Verstärkungen im Luv der Gebirge in Abbildung 40, dennoch ist es fast nicht möglich mit der hier verwendeten Methode genauere Aussagen zu treffen, da die Frontlinien nicht erst im Gebirge entstehen. Sinnvoller wäre demnach eine längere Verfolgung von Frontlinien. Für einzelne Fallbeispiele wäre dies möglich, aber weniger für die Betrachtung von einem Zeitraum von 11 Jahren.

Dennoch werden noch kurz zur Übersicht einige weitere Informationen die bei der Auswer-

tung herauskamen dargestellt.



Abbildung 41: Aufteilung der 150 Frontengewittertage in Frontengewitter mit Konvergenzlinie und Frontengewitter ohne Konvergenzlinie

Von den insgesamt 150 Frontengewittertagen, lag nur in 15 % der Fälle Konvergenzlinie vor. Bei den meisten Frontengewittertage wurde keine Konvergenzlinie beobachtet. Diese Beobachtungen wurden nicht selbst vorgenommen, sondern von den analysierten Bodenwetterkarten übernommen.

Eine zeitliche Häufigkeitsverteilung der Entstehungszeiten von allen Frontengewitter wird in Abbildung 42 dargestellt. Diese Abbildung kann auch für alle Frontengewittertage ohne Konvergenzlinie hergenommen werden, da nur 15 % aller Frontengewitter mit Konvergenzlinie beobachtet wurde, existiert zwischen allen Frontengewitter und Frontengewitter ohne Konvergenzlinien ein nicht auffallender Unterschied. Die zeitliche Häufigkeitsverteilung für Frontengewitter mit Konvergenzlinie wird in Abbildung 43 gezeigt. Auffallend sind die zeitlichen Unterschiede der zwei Arten von Frontengewittern. Bei Frontengewitter ohne Konvergenzlinie (siehe Abbildung 42) sind die Entstehungszeiten über den ganzen Tag verteilt mit Hauptzeiten um 15 Uhr und 16 Uhr, aber auch nachts und früh morgens sind recht hohe Werte vertreten. Bei Frontengewitter mit Konvergenzlinie (siehe Abbildung 43) ist eine deutlichere Häufung um die Mittagszeit zwischen 12 Uhr und 14 Uhr zu erkennen. In der Nacht sind zwar im Vergleich zu den Luftmassengewitter immer noch recht hohe Werte auffindbar, aber deutlich weniger als bei Frontengewittern ohne vorgelagerte Konvergenzlinie. Demnach scheinen die Bildung von vorgelagerten Konvergenzlinien abhängig von der Tageszeit zu sein, ähnlich wie bei Luftmassengewitter.

Die Darstellung könnte durch den Umstand verfälscht sein, dass Luftmassengewitter die tagsüber entstehen auch schon mit in die Auswertung eingehen, obwohl die eigentliche Front erst abends durch das COPS Gebiet durchziehen könnte. Daher ist es möglich, dass die hohen Werte der Entstehungszeiten in den Abbildungen nicht zwingend Fronten darstellen, sondern vielleicht Luftmassengewitter, die zufällig sich am gleichen Tag der Front gebildet haben.



Zeitliche Häufigkeitsverteilung der maximalen RADAR-Reflektivitäten fuer alle Frontengewitter

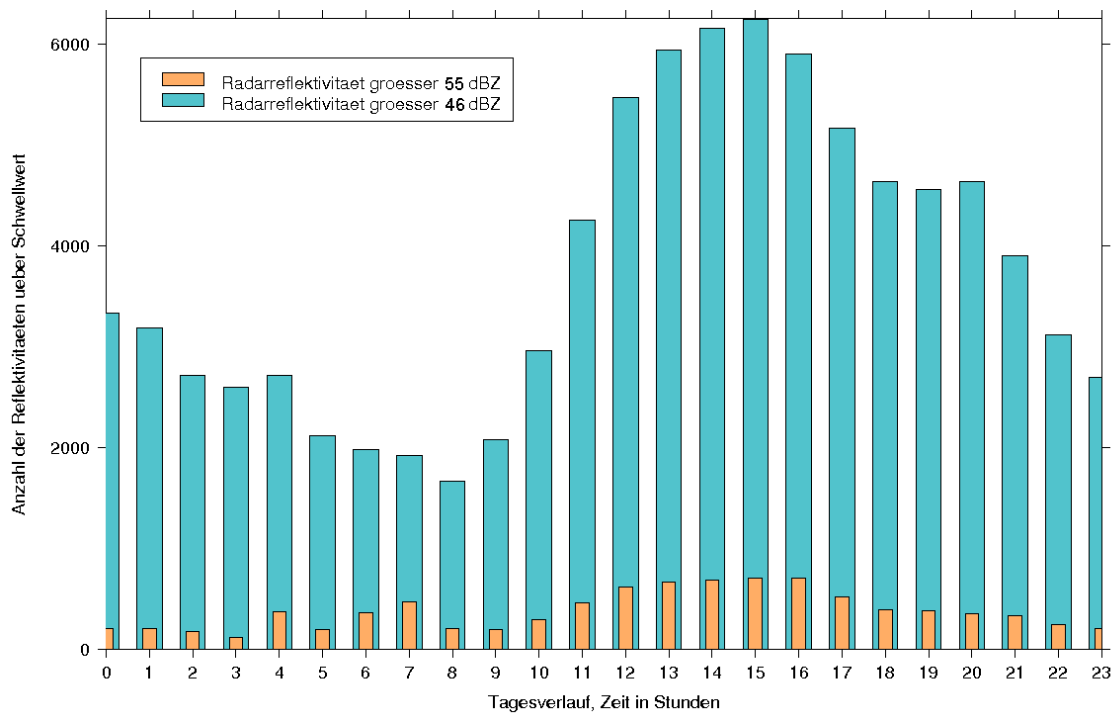


Abbildung 42: Zeitliche Häufigkeitsverteilung aller Frontengewitter. Auf der Abszisse ist der Tagesverlauf in Stunden dargestellt, die Zeitangaben sind in UTC. Auf der Ordinate sind die Anzahlen der Reflektivitätswerte über Schwellwert angegeben.

## Zeitliche Häufigkeitsverteilung der maximalen RADAR-Reflektivitäten fuer alle Frontengewitter mit Konvergenzlinien

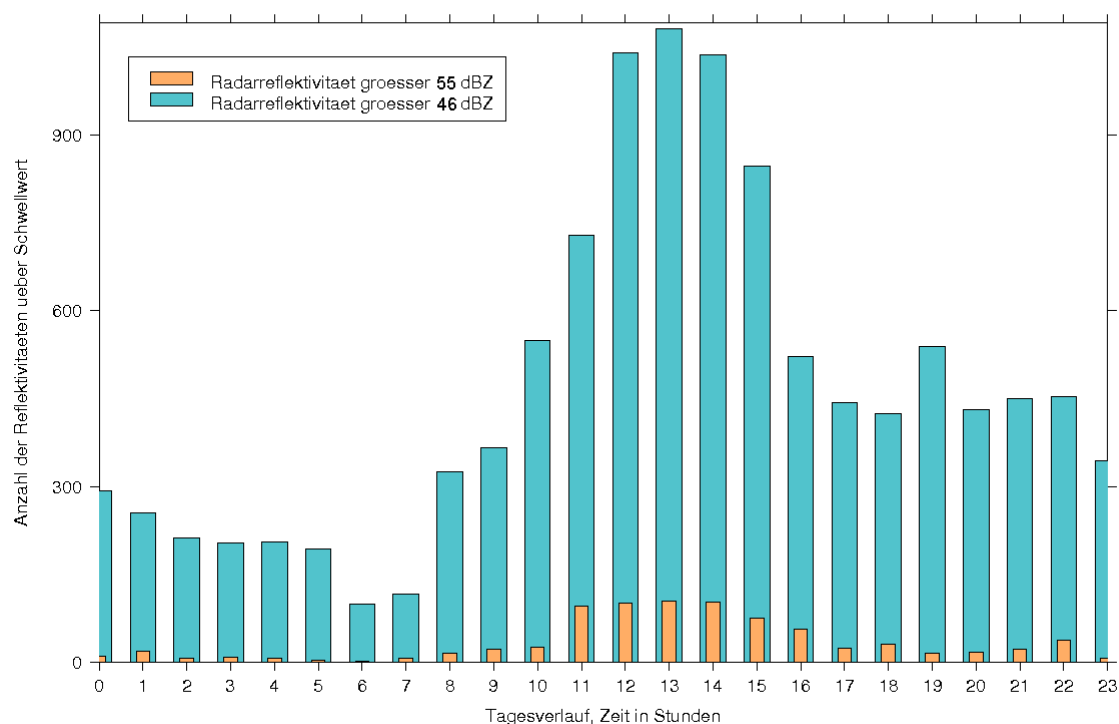


Abbildung 43: Zeitliche Häufigkeitsverteilung aller Frontengewitter die im Zusammenhang mit einer Konvergenzlinie aufgetreten sind. Auf der Abszisse ist der Tagesverlauf in Stunden dargestellt, die Zeitangaben sind in UTC. Auf der Ordinate sind die Anzahlen der Reflektivitätswerte über Schwellwert angegeben.

Die Windrichtungen bei Frontengewittertagen wurden nicht genauer analysiert. Durch die Abfolge der Radarbilder, ist aber aufgefallen, das in den meisten Fällen eine Westströmung bis Südwestströmung vorlag.

### Vergleich verschiedener Gewitterparameter

Die nächsten drei Abbildungen zeigen wie schon bei den Luftmassengewitter (siehe Kapitel 4.3.3) verschiedene Parameter im Vergleich.

In Abbildung 44 und 45 werden die verschiedenen Parameter wie schon bei den Luftmassengewitter (siehe Abbildung 20), nur dieses Mal für die Frontengewitter miteinander verglichen.

## Frontengewitter (mit Konvergenzlinien)

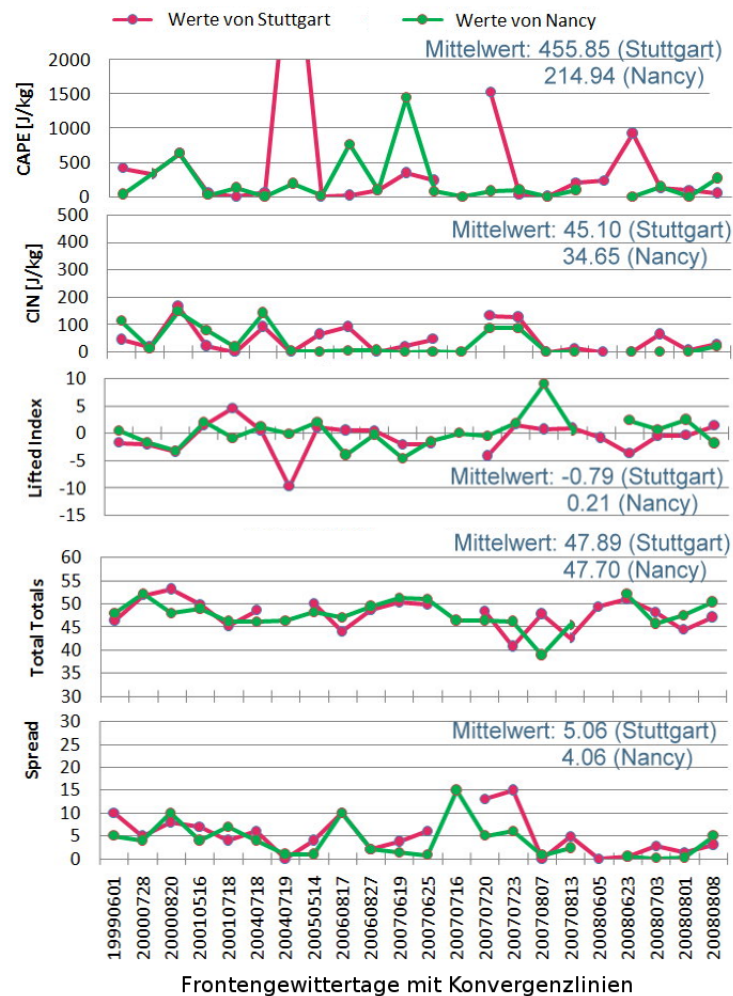


Abbildung 44: Verschiedene Parameter aus Radiosondenaufstiege von Stuttgart (pink) und Nancy (grün) für Frontengewittertage mit Konvergenzlinien. Auf der Abszisse befinden sich alle Einzelzellengewittertage. Auf der Ordinate die verschiedenen Parameter von oben nach unten: CAPE, CIN, LI, TT, Spread. Dazu sind die jeweiligen Mittelwerte der Parameter für alle Frontengewittertage mit Konvergenzlinien angegeben.

Betrachtet man in Abbildung 44 die CAPE Werte, ergeben sich selten aber dann doch recht hohe Werte von über 1000 J/kg. In der Regel aber sind deutlich mehr Werte zwischen 0 und 300 J/kg vorhanden. Der Mittelwert zwischen den beiden Station ergibt einen recht großen Unterschied. 455.85 J/kg in Stuttgart, während es in Nancy nur 214.94 J/kg sind. Hervorgerufen wird dieser hohe Mittelwert von 455.85 J/kg durch einen einzelnen Tag mit extrem hohen CAPE Wert von über 2000 J/kg am 19.07.2004. Vernachlässigt man diesen einen Wert, so liegt der Mittelwert mit 273 J/kg im Bereich des Wertes von Nancy.

Des Weiteren erkennt man ein Zusammenhang im Bereich von erhöhten CAPE Werte mit besonders negativen Lifted Indices. Betrachtet man zum Beispiel den CAPE und Lifted Index des Stuttgarter Radiosondenaufstiegs, so erkennt man am 19.07.2004 sowie am 20.07.2007 und 23.06.2008 eine Korrelation von erhöhten CAPE Werten mit jeweils einem ausgeprägten negativen Lifted Index. Im Falle eines stark positiven LI zum Beispiel bei dem Radiosondenaufstieg von Nancy am 07.08.2007 sind die beiden CAPE Werte sehr



gering. Von der Feuchte scheinen die anderen Parameter nicht sehr stark abzuhängen. Aber oft beobachtet man bei guter Labilität einen sehr geringen Spread, was für hohe Feuchtigkeit spricht und noch bessere Chancen für Gewitterentstehungen.

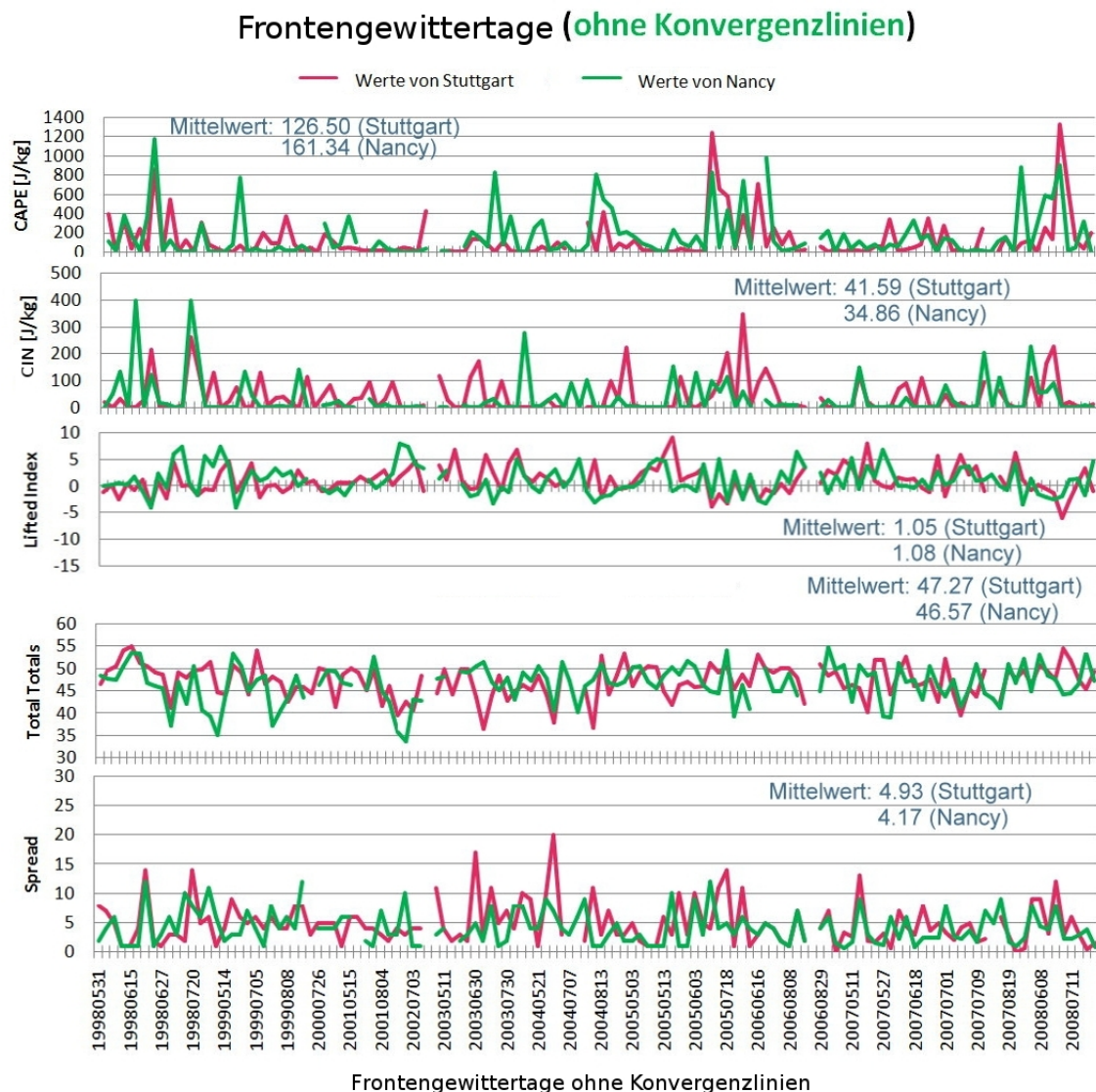


Abbildung 45: Verschiedene Parameter aus Radiosondenaufstiege von Stuttgart (pink) und Nancy (grün) für Frontengewittertage ohne Konvergenzlinien. Auf der Abszisse befinden sich alle Einzelzellengewittertage. Auf der Ordinate die verschiedenen Parameter von oben nach unten: CAPE, CIN, LI, TT, Spread. Dazu sind die jeweiligen Mittelwerte der Parameter für alle Frontengewittertage ohne Konvergenzlinien angegeben.

Die durchschnittlichen CAPE Werte bei Frontengewitter ohne Konvergenzlinien sind relativ gering. Es treten zwar ab und zu Werte mit über 1000 J/kg auf, aber das scheint eher die Ausnahme zu sein. Die CIN Werte scheinen in den meisten Fällen unter 100 zu liegen, können aber durchaus auch mal hohe Werte wie 300 J/kg erreichen. So dass sie doch einen recht geringen Durchschnittswert von von 30 bis 40 J/kg aufweisen. Der Lifted Index befindet sich im Mittel eher im positiven Bereich, was zusammen mit dem niedrigen CAPE Wert nicht für gute Voraussetzung für Gewitterbildung spricht. Die Mittelwerte des Total Totals sowie des Spreads, stimmen relativ gut mit den Werten bei Vorhandensein

einer Konvergenzlinie überein.

Bei dem Vergleich der Mittelwerte zwischen Frontengewitter mit Konvergenzlinien und ohne Konvergenzlinien fällt auf, dass die CAPE Werte bei vorhandener Konvergenzlinie deutlich höher liegen als ohne vorhandener Konvergenzlinie. Die CIN bleibt dafür relativ gleichwertig. Der Unterschied im Lifted Index ist auch zu beachten. Dadurch ergibt sich letztendlich eine labilere Schichtung bei Frontengewitter mit vorliegenden Konvergenzlinien, welche zu vermehrten Gewitteraktivitäten führen kann. Genügend Feuchte scheint in jedem Fall wichtig zu sein. Dennoch unterliegen die Parameterwerte zwischen den einzelnen Gewittertagen recht hohen Schwankungen, sodass nicht wirklich eine klare Aussage getroffen werden kann.

	CAPE		CIN		LI		TT		Spread	
M.K.	455.85	214.94	45.10	34.65	-0.79	0.21	47.89	47.70	5.06	4.06
O.K.	126.50	161.34	41.59	34.86	1.05	1.08	47.27	46.57	4.93	4.17

Tabelle 9: Zeigt zusammenfassend die Mittelwerte der verschiedenen Parameter (aus den Abbildungen 44, 45 für Frontengewitter mit Konvergenzlinien (M.K.) und Frontengewitter ohne Konvergenzlinien (O.K.) für die zwei Stationen, Stuttgart (linker Wert) und Nancy (rechter Wert).

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurden klimatologische Eigenschaften von Gewittern in der Mittelgebirgsregion am Oberrheingraben in Südwestdeutschland und Ostfrankreich untersucht. Der Schwerpunkt der Auswertung lag dabei bei Luftmassengewittern anstatt bei Frontengewittern, da Luftmassengewitter im Bezug zu komplexen Terrain, lokal initiiert werden und nicht durch große synoptische Systeme gesteuert werden.

Die Datengrundlagen für die Auswertung lieferten Radarmessungen, Blitzmessungen, Radiosondenaufstiege und Bodenwetterkarten die von verschiedenen Anbietern für die Jahre 1998 bis 2008 zur Verfügung standen.

Zunächst wurden Gewittersysteme ermittelt und ihre Eigenschaften im Bezug zu den Beobachtungszeitraum analysiert. Danach erfolgte eine neue Einteilung in Luftmassengewitter (mit Gewittertypen wie Einzelzellen-, Multizellen- und Superzellengewitter) und Frontengewitter (ohne Konvergenzlinien und mit Konvergenzlinien). Es wurden Entstehungsorte von Luftmassengewitter und Zugrichtungen in Abhängigkeit der vorliegenden Windrichtung ermittelt. Außerdem wurden Entstehungszeiten analysiert sowohl von Luftmassengewittern als auch von Frontengewittern, sowie die Zusammenhänge verschiedener Parameter, die die Eigenschaften von Gewittern charakterisieren.

Im Bezug zum Beobachtungsjahr der Messkampagne 2007 lässt sich sagen, dass dieses Jahr vergleichsweise zu anderen Jahren eine recht hohe Gewitterrate aufzeigte. Welches durchaus eine Folge sein kann durch die vermehrten Messsensoren die aufgrund der Messkampagne im Einsatz waren. Die meisten Gewitter stammten dabei von Frontengewittern. Weniger stark vertreten waren mesoskalige konvektive Systeme.

Bei Frontengewitter wurde auf eine detailliertere Analyse des Entstehungsortes verzichtet, da Frontengewitter nicht erst im Untersuchungsgebiet entstehen und daher genaue Aussagen nicht möglich waren, es sei denn man betrachtet einzelne Fallbeispiele. Der Beobachtungszeitraum von 11 Jahren erschien dafür aber zu groß. Dennoch waren bei der Auswertung der Auftretungsorte auffällig mehr Gewitter im westlichen Bereich des Südschwarzwaldes zu beobachten. Auch scheinen Frontengewitter einem tageszeitlichen Verlauf zu unterliegen, mit viel Gewitteraktivität in den Mittags- und Nachmittagsstunden.

Die Hauptwindrichtung in dem Untersuchungsgebiet kommt aus Westen, Südwesten bis Süden. Damit ergaben sich für die Zugrichtungen, die in den meisten Fällen entgegengesetzt der Windrichtung waren, eine Zugrichtung nach Nordosten. Aufgrund des komplexen Terrains, ergeben sich in niedrigen Höhengniveaus aber durchaus Abweichungen der Hauptzugrichtungen.

Die Entwicklungsorte von Luftmassengewittern befinden sich vorwiegend über Gebirge. In Abhängigkeit von der Windrichtung entstehen sie auffallend zentral über dem Gebirge und besonders im Leebereich derselben. Durch Bildung von Konvergenzzonen die sich bei südlichen Windrichtung ergeben, sind aber auch im nördlichen Oberrheintal vermehrt Gewitter aufgetreten. Interessant wäre eine zusätzliche Untersuchung der Entstehungsorte von Luftmassengewittern in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit, um festzustellen ob bei schwachen Winden tatsächlich ein Zusammenhang besteht mit der Vermutung von

[Hagen, M., et al., 2009], dass sich die Gewitter eher zentral über dem Gebirge bilden und bei stärkeren Winden vermehrt im Lee der Gebirge.

Im Hinblick auf die tageszeitliche Verteilung der Luftmassengewitter kann darauf geschlossen werden, dass sich beim Vorhandensein von Gebirgen Gewitter etwa eine bis zwei Stunden früher bilden, also etwa zwischen 9 und 10 Uhr UTC als in Ebenen, dort bilden sie sich gegen 11 und 12 Uhr UTC. Die meiste Gewitteraktivität findet um 15 Uhr statt.

Der Bezug zu bestimmten Wetterlagen wurde in dieser Arbeit nicht behandelt, da schon in einer vorherigen Arbeit [Bartenschlager, B., 1997] zwischen Gewittertypen und Wetterlagen keine großen Zusammenhänge gefunden werden konnten.

Der Parameter CAPE welcher von den Radiosondenaufstiegen von Stuttgart und Nancy zur Verfügung stand, lieferte erstaunlich schwache Werte bei eigentlich sehr aktiven Luftmassengewittern. Hier tritt das Problem auf, dass die zur Verfügung stehenden Radiosondenaufstiegen oft den Zustand der Atmosphäre zum Zeitpunkt der Gewitterereignisse schlecht repräsentieren. Hinzu kommt, dass die aus der Literatur angegebenen Werte für CAPE, nach [Weisman, M. L. und Klemp, J. B., 1982], nicht unbedingt auf das zu untersuchende Gebiet zutreffen. Aus diesem Grund wurde versucht bei dieser Auswertung auf einen Vergleichswert aus den Niederlanden zurückzugreifen [Haklander, Van Delden, 2003], die in den meisten Fällen mit den Werten von dem Untersuchungsgebiet auch etwas besser übereinstimmen. Dennoch fielen die Werte von Nancy und Stuttgart in den meisten Fällen zu gering aus.

Größere Schwierigkeiten gab es auch bei der Einteilung von Gewittersystemen. Dadurch, dass mehrere Gewittersysteme innerhalb eines Tages auftreten können, war nicht immer ein Tag eindeutig zu einem Gewittertyp zuordenbar. Vor allem bei Frontengewittertagen, bei denen die Front erst gegen Abend durchgezogen, gab es häufig tagsüber auch Luftmassengewitterbildungen. Diese Überschneidungen können sich durchaus auf die Ergebnisse der Auswertungen auswirken. Eine andere Möglichkeit wäre unter Umständen für Frontengewittertage eine weitere Zeiteinteilung zwischen Tags und Nachts zu definieren.

Eine weitere Möglichkeit um die verschiedenen Gewittersysteme und Gewittertypen genauer zu charakterisieren, wäre eine unabhängige Bewertung in Form eines Algorithmus, damit mögliche subjektive Empfindungen nicht mit berücksichtigt werden können.

# Literatur

- [Adrian, G. und Fiedler, F., 1991] Adrian G., F. Fiedler, 1991: Simulation of unstationary wind and temperature fields over complex terrain and comparison with observations. *Contr. Atmos. Phys.* 64, 27–48.
- [André, W. C., 2004] André, W., C., 2004: Meteorologie für Sportpiloten. Aero Service André 2004
- [Banta, R. M., 1990] Banta, R. M., 1990: The role of mountain flows in making clouds. *Atmospheric Processes over complex Terrain, Meteo.Monogr.*, No.45, Amer.Meteor.Soc., 173-228.
- [Bartenschlager, B., 1997] Bartenschlager, B., 1997: Entstehung und Verlagerung von Gewittern in Süddeutschland. Diplomarbeit, 81pp.
- [Beheng, K. D., 1998] Beheng, K. D., 1998: Grundlagen der Wolkenmikrophysik und der Dynamik von Wolken und Fronten. *Annalen der Meteorologie* 38, Herbstschule Radarmeteorologie, 7-24.
- [Dotzek, N., 2001] Dotzek, N., 2001: Tornadoes in Germany. *Atmos. Res.* 56, 233-251.
- [Emmanuel, 1994] Emmanuel, K. A., 1994: *Atmospheric Convection*. Oxford University Press.
- [Finke, U. und Hauf, T., 1996 a] Finke, U. und Hauf, T., 1996 a: The Characteristics of Lightning Occurrence in Southern Germany. *Contr. Atmosph. Phys.*, August 1996, 361-374.
- [Goler, R., SoSe 2006] Goler R., 2006: *Tempanalyse, Rules of Thumb*. Version Sommersemester 2006
- [Hagen, M., et al., 2009] Hagen, M., Van Baelen, J., Richard, E., 2009: Influence of the windprofile on the Location of Hotspots of convection in mountainous Terrain. *DWD Annalen der Meteor.* 44, 30th International Conference on Alpine Meteorologie, 2009 Rastatt.
- [Haklander, Van Delden, 2003] Haklander, A. J., Van Delden, A., 2003: Thunderstorm predictors and their forecast skill for the Netherlands. *Atmos. Research* 67-68 (2003) 273-299.

- [Hannesen, R., 1998] Hannesen, R., 1998: Analyse konvektiver Niederschlagssysteme mit einem C-Band Dopplerradar in orographisch gegliedertem Gelände. Dissertation, Univ. Karlsruhe, 119 pp.
- [Hannesen, R., et al., 1998] Hannesen, R., Dotzek, N., Gysi, H. und Beheng, K., D., 1998: Case study of a tornado in the Upper Rhine valley. Meteorol. T., N. F. 7, 163-170.
- [Höller, H. 1994] Höller, H., 1994: Mesoscale organisation and hailfall characteristics of deep convection in southern Germany. Beitr. Phys. Atmosph., 67, 219-234.
- [Huntrieser, et al., 1997] Huntrieser, H., Schiesser, H. H., Schmid, W., Waldvogel, A., 1997: Comparison of traditional and newly developed thunderstorm indices for Switzerland. Weather Forecast. 12, 108-125.
- [Jacovides und Yonetani, 1990] Jacovides, C. P., Yonetani, T., 1990. An evaluation of stability indices for thunderstorm prediction in Greater Yprus. Weather Forecast. 5, 559-569.
- [Kalthoff, N., et al., 2008] Kalthoff, N., Adler, B., Bartholtt, Ch., Corsmeier, U., Mobbs, S., Crewell, S., Träumner, K., Kottmeier, Ch., Wieser, A., Smith, V., The impact of convergence zones on the Initiation of deep convection: A case study from COPS, Atmospheric Research (2009), doi:10.1016/j.atmosres.2009.02.010
- [Ludlam, F. H., 1980] Ludlam, F. H., 1980: Clouds and Storms. The Behavior and Effect of Water in the Atmosphere. Pennsylvania State Univ. Press, Univ. Park, 405 pp.
- [Majewski und Ritter, 2006] Majewski, D., Ritter, B., 2006: Gebirgsflüsse in operationellen numerischen Wettervorhersagemodellen. promet, Jahrg. 32, Nr. 1/2, 68-74.
- [Oke, T. R., 1987] Oke, T. R., 1987: Boundary Layer Climates 2d ed. University Press, Cambridge, 435 pp.
- [Orville, H. D., 1965] Orville, H. D., 1965: A numerical study of the initiation of cumulus clouds over mountainous terrain. J. Atmos. Sci., 22, 684-699.

- [Orville, H. D., 1968] Orville, H. D., 1968: Ambient wind effects on the initiation and development of cumulus clouds over mountain. *J. Atmos. Sci.*, 25, 385-403.
- [Riemann-Campe, et al., 2009] Riemann-Campe, K., Fraedrich, K., Lunkeit, F., 2009: Global climatology of Convective Available Potential Energy (CAPE) and Convective Inhibition (CIN) in ERA-40 reanalysis. *Atmos. Research*, 93 (2009) 534-545.
- [Rinehart, R. E., 1991] Rinehart, R. E., 1991: Radar for Meteorologists. ISBN 0-9608700-7-5
- [Schiesser et al., 1995] Schiesser, H. H., R. A. Houze JR und Huntrieser H., 1995: The mesoscale structure of severe precipitation systems in Switzerland. *Mon. Wea. Rev.* 123, 2070-2097.
- [Schreiber K. J. 1998] Schreiber, K. J. 1998: Der Radarverbund des Deutschen Wetterdienstes. *Annalen der Meteorologie*, 38, Herbstschule Radarmeteorologie 1998.
- [Schultz, 1989] Schultz, P., 1989. Relationships of several stability indices to convective weather events in northeast Colorado. *Weather Forecast.* 4, 73-80.
- [Smith, R. K. WS 04/05] Smith, R. K., Version WS 04/05: Einführung in die Meteorologie: Teil III, 162 pp.
- [Van Delden, 2001] Van Delden A., 2001: The synoptic setting of thunderstorms in Western Europe. *Atmos. Res.* 56, 89-110.
- [Weisman, M. L. und Klemp, J. B., 1982] Weisman, M. L., und Klemp, J. B., 1982: The dependency of numerically simulated convective storms on vertical wind shear and buoyancy. *Mon. Wea. Rev.*, 110, 504-520.
- [Weisman, M. L., und Klemp, J. B., 1986] Weisman, M. L., und Klemp, J. B., 1986: Characteristics of isolated convection. *Mesoscale Meteorology and Forecasting*. P. S. Ray, Ed., Amer. Meteor. Soc., 331-358.
- [Wegener, 1917] Wegener, A., 1917: Wind- und Wasserhosen in Europa. Vieweg, Braunschweig, 301 pp.
- [Williams und Renno, 1993] Williams, E., Renno, N., 1993: An analysis of the conditional instability of the tropical atmosphere. *Mon. Weather Rev.* 121, 21-36.



[Wulfmeyer, V., et al., 2008]

Wulfmeyer, V., et al., 2008: The Convective and Orographically -induced Precipitation Study. Bull. Amer. Meteor. Soc., 89, 1477-1486.

# Anhang

## Luftmassengewitter

### Einzelzellengewittertage:

19980605 20000511 20010729 20040710 20060529 20070715  
19980606 20000604 20020510 20040711 20060530 20070722  
19980611 20000620 20020603 20040712 20060613 20070814  
19980818 20000712 20020609 20040723 20060614 20070828  
19990501 20000715 20020729 20040724 20060619 20080512  
19990505 20000716 20020807 20040804 20060704 20080513  
19990520 20000717 20020824 20040808 20060705 20080514  
19990525 20000727 20020825 20040809 20060707 20080516  
19990614 20000730 20030514 20040829 20060709 20080517  
19990626 20000804 20030530 20050528 20060712 20080603  
19990703 20000815 20030601 20050529 20060723 20080630  
19990708 20000830 20030604 20050621 20060724 20080713  
19990711 20000831 20030615 20050627 20060725 20080823  
19990712 20010502 20030625 20050628 20060730  
19990718 20010505 20030627 20050706 20060806  
19990722 20010513 20030720 20050708 20060812  
19990727 20010524 20030722 20050709 20060819  
19990803 20010525 20030731 20050814 20060820  
19990812 20010606 20030805 20060505 20070506  
19990818 20010613 20030806 20060507 20070520  
19990827 20010617 20030808 20060508 20070531  
20000501 20010618 20030809 20060512 20070605  
20000504 20010704 20040503 20060514 20070612  
20000507 20010727 20040511 20060515 20070704  
20000508 20010728 20040620 20060522 20070711

### **Multizellengewittertage:**

19990530 20010724 20030608 20050625 20060728 20070824  
19990531 20010725 20030617 20050626 20060729 20080511  
19990713 20010803 20030703 20050712 20060804 20080515  
19990719 20010818 20030724 20050715 20060814 20080529  
19990728 20010827 20030813 20050716 20060824 20080530  
19990804 20020509 20030814 20050727 20070503 20080606  
19990806 20020511 20030815 20050728 20070521 20080609  
19990811 20020621 20030817 20050821 20070522 20080610  
19990828 20020713 20030820 20060506 20070523 20080611  
20000505 20020730 20040512 20060617 20070524 20080701  
20000506 20020806 20040602 20060625 20070602 20080702  
20000510 20020819 20040627 20060627 20070604 20080726  
20000513 20020820 20040717 20060628 20070607 20080727  
20000613 20020826 20040720 20060629 20070608 20080728  
20000614 20020831 20040721 20060706 20070609 20080729  
20000714 20030509 20040726 20060711 20070610 20080730  
20000723 20030524 20040803 20060713 20070613 20080807  
20000808 20030528 20040805 20060714 20070620 20080811  
20000814 20030529 20040806 20060719 20070710  
20010510 20030531 20040807 20060720 20070718  
20010602 20030602 20040812 20060721 20070802  
20010616 20030603 20050530 20060722 20070806  
20010627 20030606 20050622 20060726 20070812  
20010723 20030607 20050623 20060727 20070823

**Superzellengewittertage:**

19990707

20000502

20000503

20000603

20020619

20020809

20030623

20040609

20040610

20050819

20060615

20060708

20060805

20070525

20070606

20070611

20070614

## Frontengewittertage

### Frontengewittertage ohne Konvergenzlinien:

19980531 19990808 20030630 20050513 20070511 20080608  
19980602 19990826 20030701 20050520 20070513 20080622  
19980607 20000702 20030721 20050521 20070515 20080624  
19980614 20000703 20030727 20050522 20070516 20080625  
19980615 20000726 20030730 20050603 20070527 20080711  
19980616 20000802 20030816 20050613 20070615 20080720  
19980622 20000821 20030828 20050629 20070616 20080815  
19980626 20000827 20030829 20050704 20070617 20080819  
19980627 20010515 20040521 20050718 20070618  
19980701 20010531 20040531 20050725 20070621  
19980707 20010714 20040611 20050729 20070622  
19980719 20010719 20040702 20060518 20070624  
19980720 20010804 20040707 20060616 20070701  
19980723 20020623 20040708 20060618 20070702  
19980727 20020624 20040722 20060731 20070703  
19980813 20020627 20040810 20060803 20070708  
19990514 20020703 20040813 20060808 20070709  
19990602 20020821 20040817 20060810 20070719  
19990603 20020823 20040818 20060818 20070721  
19990621 20030502 20040824 20060826 20070815  
19990705 20030511 20050503 20060829 20070819  
19990706 20030513 20050504 20070504 20070829  
19990714 20030519 20050506 20070505 20080518  
19990720 20030624 20050507 20070508 20080526

### **Frontengewittertage mit Konvergenzlinien:**

19990601  
20000728  
20000820  
20010516  
20010718  
20040718  
20040719  
20050514  
20060817  
20060827  
20070619  
20070625  
20070716  
20070720  
20070723  
20070807  
20070813  
20080605  
20080623  
20080703  
20080801  
20080808





## Versicherung

Ich versichere, dass ich diese Arbeit selbständig und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

München, den 05. Oktober 2009

(Leslie Grebe)



# Danksagung

Zum Gelingen dieser Arbeit haben verschiedene Personen beigetragen.

Als erstes möchte ich mich bei Herrn Professor Dr. Schumann, bei Herrn Professor Dr. George Craig und bei Herrn Dr. Thomas Gerz für die Ermöglichung der Bearbeitung des Themas am Institut für Physik der Atmosphäre am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Oberpfaffenhofen bedanken.

Ein besonderer Dank geht an Dr. Martin Hagen, der mich zu jeder Zeit mit voller Hilfsbereitschaft betreut hat und mit Anregungen und Verbesserungsvorschlägen die für das Gelingen der Arbeit entscheidend waren unterstützt hat.

Vielen Dank auch an die anderen Mitarbeiter der Abteilung für Wolkenphysik und Verkehrsmeteorologie besonders auch an meinen Zimmerkollegen Helge Tuschy für die angenehme Arbeitsatmosphäre. Ein großer Dank gebührt auch Patrick Tracksdorfer der mir bei vielen Fragen jeglicher Art weitergeholfen hat.

Vielen Dank an Jürgen Schrall und Kersten Schmidt für die hilfreiche Korrektur der Arbeit.